



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**DATABÁZE TEPELNÝCH PARAMETRŮ OBLEČENÍ PRO
SYSTÉM IHVAC**

DRIVERS CLOTHING THERMAL RESISTANCE DATABASE FOR IHVAC SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kristýna Hrubanová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Bc.Ing. Jan Fišer, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Bc. Kristýna Hrubanová**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Technika prostředí
Vedoucí práce: **Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Databáze tepelných parametrů oblečení pro systém iHVAC

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Metody predikce tepelného komfortu v podmínkách asymetrických a nestacionárních prostředí nejsou zatím uspokojivě vyřešeny. Stejně tak i energeticky efektivní tepelný management kabin vozidel je zásadním problémem především u vozidel s elektrickým či hybridním pohonem, kde spotřeby těchto systémů činí značnou část spotřeby vozu a snižuje tak dramaticky dojezd těchto vozidel. Je tedy nezbytné hledat cesty jak efektivně distribuovat teplo, chlad a větrací vzduch do kabiny, při co nejmenších energetických nárocích a také jak efektivně řídit tyto systémy. Jednou ze slibných cest je inovativní řídicí systém iHVAC, který však pro korektní predikci tepelného komfortu potřebuje přesné parametry oděvu osob v kabině.

Cíle diplomové práce:

Pro vybrané sklady oblečení vhodné pro řízení vozu v letním/zimním/přechodném období v klimatickém pásmu střední Evropy proveďte stanovení tepelných odporů pomocí vhodné měřicí metody. Následně zpracujte takto získaná data do databáze, vhodné pro využití v systému iHVAC (inovativní systém pro řízení klimatizace v kabině vozu).

Seznam literatury:

MATHUR, G. D. Vehicle thermal management: heat exchangers & climate control. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, c2004. PT (Series) (Warrendale, Pa.), 97. ISBN 076801445X.

NILSSON, H. Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models, PhD thesis, University of Gävle (2004).

ČSN EN ISO 14505-2. Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného komfortu ve vozidlech. Český normalizační institut (2007).

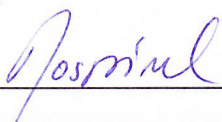
FOJTLÍN, M.; FIŠER, J.; JÍCHA, M. Determination of convective and radiative heat transfer coefficients using 34-zones thermal manikin: Uncertainty and reproducibility evaluation. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, roč. 77, č. 2016, s. 257-264. ISSN: 0894-1777.

PIDROVÁ, K. Testování tepelných vlastností rukavic pomocí tepelného manekýna. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 69 s. Vedoucí Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.

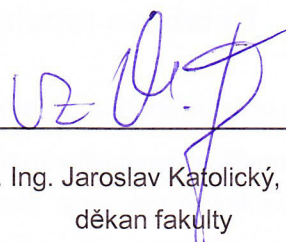
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 3. 11. 2016





doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá měřením tepelných vlastností oděvů pomocí tepelného manekýna a využitím získaných dat pro zpřesnění predikce tepelného pocitu v systému iHVAC. První část práce je věnována řešení dané problematiky a definování výpočetních vztahů potřebných pro experimentální měření. Důležitým bodem práce je volba metodiky měření dle dostupných norem a měřicího zařízení. Jádrem práce pak spočívá v měření 5 kombinací oděvů při různých kalibračních teplotách a stejné teplotě povrchu manekýna. Následně jsou zpracována naměřená data, proveden rozbor nejistot a vyhodnocena opakovatelnost měření. Dle předpokladu se podařilo potvrdit nezávislost velikosti součinitele přestupu tepla na okolní teplotě a vypočtené tepelné odpory jednotlivých oděvů jsou v práci porovnány se stávajícím šatníkem systému iHVAC. Výstupem této práce je upřesněný a doplněný virtuální šatník, který slouží pro předpověď tepelného komfortu ve vozidle.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tepelný komfort, tepelný manekýn, tepelný odpor, měření, iHVAC, součinitel přestupu tepla

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on measurement of thermal properties of clothes by thermal manikin and on application of results for prediction of thermal comfort in system iHVAC. First part of thesis is dedicated to research with relation to this topic and to definitions of main computational equations necessary for experimental measurement. The choice of method for measurement based on available standards is an important part of this thesis. The main focus of thesis lies on measuring 5 combinations of clothes at different calibration temperatures and same temperature of manikin surface. Then data are examined and also the analysis of uncertainties and repeatability is made. According to assumption, the independence of value of heat transfer coefficient to ambient temperature is confirmed and calculated heat resistance of every single clothes is compared to existing wardrobe for system iHVAC. The outcome of this thesis is specified and completed virtual wardrobe which serves to prediction of thermal comfort in car.

KEY WORDS

Thermal comfort, thermal manikin, heat resistance, measurement, iHVAC, heat transfer coefficient

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRUBANOVÁ, K. *Databáze tepelných parametrů oblečení pro systém iHVAC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 77 s. Vedoucí diplomové práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Databáze tepelných parametrů oblečení pro systém iHVAC** vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších zdrojů, které jsou všechny citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Datum

Bc. Kristýna Hrubanová

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych tímto poděkovala v první řadě svému vedoucímu Ing. Bc. Janu Fišerovi, Ph.D. za odborné vedení při zpracování práce, pomoc při přípravě a v průběhu experimentu, ale především za ochotu a čas strávený konzultacemi. Dík patří i mé rodině za podporu a trpělivost během celého studia.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	VYMEZENÍ CÍLŮ A LIMITY PRÁCE	12
3	TEORETICKÝ ZÁKLAD	13
3.1	Definice tepelné pohody	13
3.2	Tepelné procesy uvnitř člověka	14
3.2.1	Produkce tepla	14
3.2.2	Termoregulace	15
3.2.3	Vliv tepelné nepohody	17
3.3	Interakce lidského těla s okolím	18
3.3.1	Přenos tepla kondukcí	18
3.3.2	Proudění (konvekce)	20
3.3.3	Záření (radiace)	21
3.3.4	Vypařování potu	22
3.3.5	Tepelný odpor oděvu	22
3.4	Hodnocení tepelné pohody	24
4	SYSTÉM HVAC	27
4.1	Systém iHVAC a jeho účel	27
4.2	Šatník pro systém iHVAC	28
5	METODIKA MĚŘENÍ	30
5.1	Norma ČSN EN 15831	30
5.2	Norma ČSN EN 14505-2	31
5.3	Dostupné měřicí zařízení	33
5.3.1	Klimatická komora	33
5.3.2	Tepelný manekýn Newton	34
5.3.3	Měřicí přístroj TESTO	36
5.4	Návrh metodiky měření	36
6	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	39
6.1	Měřené kombinace oděvů	39
6.2	Ověření metody a pre-testy	40
6.3	Průběh samotného měření	41
7	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	42
7.1	Metoda zpracování měřených dat	42
7.2	Výsledky měření	42

7.3	Rozbor nejistot měření a opakovatelnosti	45
8	DATA PRO ŠATNÍK IHVAC	51
8.1	Porovnání se stávajícím šatníkem iHVAC	51
8.2	Diagramy komfortních zón	53
9	DISKUZE	58
10	ZÁVĚR	61
	ZDROJE.....	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	65
	SEZNAM OBRÁZKŮ	67
	SEZNAM TABULEK	69
	SEZNAM PŘÍLOH.....	70

1 ÚVOD

Neodmyslitelnou součástí každodenního života ve vyspělé civilizaci je doprava, zejména pak automobilová. Automobilový průmysl je jedním z nejvíce se rozvíjejících a modernizujících odvětví průmyslu, přičemž automobilky se již nevěnují pouze zvětšování výkonů aut, ale také snižování emisí, zavádění alternativních pohonných systémů, zlepšování interiéru automobilu a v neposlední řadě také komfortu cestování.

Lidé tráví v kabině vozu nezanedbatelnou část svého života a kladou proto vysoké nároky na kvalitu cestování. Komfort v kabině může být jedním z faktorů, který ovlivní výběr vozidla a lze konstatovat, že s rostoucími nároky na celkový komfort v kabinách vozů rostou i nároky na tepelný management ve voze. Hledají se tedy způsoby, jak zajistit co možná nejlepší distribuci tepla, chladu a větracího vzduchu ve vozidle při zachování energetické efektivity a nízkých ekonomických nákladů. Spotřeba energie se ukázala jako limitující faktor především u vozidel hybridních či s elektrickým pohonem, kde dochází v důsledku spotřeby energie na chlazení/vytápění k výraznému zkrácení dojezdu. Jedním z řešení tohoto problému by mohl být inovativní systém pro řízení HVAC (innovative system for Heating, Ventilation and Air-Conditioning control-iHVAC-inovativní systém pro řízení vytápění, větrání a klimatizace), který využívá k předpovědi tepelného pocitu princip měření ekvivalentní teploty ve voze a její vyhodnocení dle diagramu komfortních zón. Výsledkem je pak predikce, která obsahuje informaci o možném riziku tepelné nepohody v určité zóně kabiny, řídicí systém využívá tuto informaci k detailnímu nastavení HVAC jednotky a řidič může pouhým dotykem na display ovlivnit lokální nastavení klimatizačního systému.

Jelikož venkovní podmínky, ať už se jedná o teplotu či vlhkost vzduchu, nejsme schopni ovlivnit ani dlouhodobě předvídat, je nezbytné nastavit klimatizační systém ve vozidle tak, aby byl schopen co nejrychleji reagovat na celou škálu působících faktorů. Jednou z nejdůležitějších okrajových podmínek je právě oblečení osoby sedící ve vozidle. Tepelný odpor oděvu má zásadní vliv na tepelnou bilanci těla a výsledný tepelný pocit člověka. Právě systém iHVAC s tímto činitelem pracuje a jeho snahou je zohlednit skladbu oblečení cestujících a zajistit tak tepelnou pohodu/komfort v kabině vozu.

Cílem této diplomové práce je především navrhnout metodiku měření součinitele přestupu tepla dle dostupných norem a následně ověřit a upřesnit hodnoty tepelných odporů vybraných skladeb oblečení používaných jako vstupní parametr pro systém iHVAC. Na základě měření budou stanoveny diagramy komfortních zón, které systém využívá pro predikci tepelného pocitu a komfortu.

2 VYMEZENÍ CÍLŮ A LIMITY PRÁCE

Vymezení cílů práce:

- Vytvoření metodiky měření celkových tepelných odporů oděvů pro kabiny vozů dle dostupných norem ČSN EN 15831 a ČSN EN 14505
- Určení součinitelů přestupu tepla jednotlivých skladeb oblečení
- Porovnání součinitelů přestupu tepla pro různé kalibrační teploty
- Rozbor nejistot a opakovatelnosti měření
- Sestavení diagramů komfortních zón
- Porovnání získaných hodnot se stávajícím šatníkem pro systém iHVAC

Vymezení limitů práce

- Měření probíhá dle metodiky, která vychází z požadavků normy ČSN EN 15831 – Oděvy – Fyziologické účinky – Měření tepelné izolace pomocí tepelné figuríny doplněné však o specifikace měření pro kabiny vozů dle ČSN EN 14505 (specifikováno níže)
- Počty měření byly limitovány časovou náročností experimentu a omezenou časovou možností využití měřicího zařízení
- Práce se nezabývá materiály, ze kterých může být daný druh oděvu vyroben a které mají vliv na součinitel přestupu tepla

3 TEORETICKÝ ZÁKLAD

Problematika tepelné pohody úzce souvisí se subjektivním vnímáním okolních podmínek člověkem. Jedná se o fyziologické vnímání tepla či chladu, ale také o to, jak mozek danou situaci vyhodnotí. Různí lidé se mohou ve stejných podmínkách cítit odlišně [3].

Následující podkapitoly se věnují definici tepelné pohody, tím jak člověk reaguje na změny okolí a jak s okolím interaguje. Následně jsou nastíněny způsoby hodnocení tepelného komfortu.

3.1 Definice tepelné pohody

Tepelná pohoda, jinak nazývaná tepelný komfort, je stav mysli, který vyjadřuje spokojenost s tepelným prostředím [1]. Jinak lze definovat tepelnou pohodu jako spokojenost člověka s tepelným stavem prostředí, či s tepelně vlhkostním klimatem [2]. Posuzování tepelného komfortu je složitý proces, který závisí na mnoha faktorech a je ovlivněn jednak fyzikálními (teplota, vlhkost apod.) fyziologickými (věk, pohlaví, tělesná konstituce apod.) ale i psychickými (únava, stres, vyčerpání apod.) vstupními parametry [1], [3]. Každý člověk hodnotí tepelný komfort na základě svého subjektivního vnímání. Tepelný komfort je tedy čistě subjektivní veličinou. Na základě série měření a dotazování větší skupiny osob jsme schopni statisticky určit „průměrný“ tepelný pocit, jaký by pociťovala v daném prostředí většina lidí. Tepelný komfort následně vystihuje, jak je člověk spokojen nebo nespokojen s tepelnými pocity [3].

Existuje několik základních faktorů, které ovlivňují tepelný stav prostředí [2],[3]:

- Faktory na straně člověka:
 - Činnost člověka
 - Tepelný odpor oděvu
- Faktory na straně okolí:
 - Teplota okolního vzduchu
 - Teplota okolních ploch (střední radiační teplota)
 - Relativní vlhkost vzduchu
 - Rychlost proudění vzduchu

Činitele prostředí významně ovlivňují především výměnu tepla mezi člověkem a okolím, jedná se o konvekci, radiaci a vedení. Jednotlivé procesy přenosu tepla s okolím budou popsány v samostatné podkapitole. Při pobytu člověka v automobilu nejsme schopni libovolně měnit žádný z faktorů na straně okolí, proto je třeba se zaměřit právě na činitele na straně člověka. Činnost člověka je úzce spjata s vhodným oděvem. Obecně platí, čím větší fyzická námaha, tím větší produkuje tělo metabolické teplo a tím menší tepelný odpor oděvu je zapotřebí. Pro větší názornost byla zavedena jednotka clo, která vyjadřuje právě tepelný odpor oděvu. 1clo odpovídá průměrnému zimnímu oblečení a tepelnému odporu $R = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ [3], [4].

Předpokladem k tomu, aby se člověk cítil v daném prostředí komfortně, je dosažení tepelné rovnováhy mezi teplem produkovaným metabolismem člověka a teplem odvedeným do okolí pomocí standartních mechanismů přenosu tepla jako je konvekce, radiace a kondukce. Důležitým předpokladem je však dosažení této pohody s minimálním využitím

termoregulačních mechanismů v lidském těle jako je mokré pocení, vasokonstrikce, vasodilatace nebo kontrakce svalů/svalový třes [2].

3.2 Tepelné procesy uvnitř člověka

Jak již bylo uvedeno výše, lidské tělo tepelně interaguje s okolím, přičemž se snaží dosáhnout tepelné rovnováhy a udržet stálou teplotu jádra tak, aby bylo zajištěno správné fungování všech orgánů v těle. V následující kapitole budou popsány tepelné mechanismy odehrávající se v lidském organismu a vliv nevhodných podmínek na fyziologické procesy v těle.

3.2.1 Produkce tepla

Metabolické procesy v lidském těle jsou hlavním zdrojem metabolického tepla neboli metabolického toku. Většina tepla vznikajícího v lidském těle pochází z energie uvolňované ve svalech (až 70 %) a v orgánech (30 %) [2], [6]. Množství uvolňované energie je závislé na hmotnosti člověka, ale také na činnosti, kterou vykonává. Průměrný dospělý člověk produkuje v klidu asi 100 W. Kvůli nízké mechanické účinnosti je většina energie přeměněna na teplo a odchází pokožkou do okolí, tzn. pouze asi 20 % vzniklé energie je přeměněno na mechanickou práci vykonávanou člověkem, a to pouze za optimálních podmínek (např. při jízdě na kole), jinak je účinnost lidského těla ještě nižší. Jelikož většina tepla odchází pokožkou, je vhodné vyjádřit tepelný tok v závislosti na ploše, tedy hustotu metabolického tepelného toku. Dospělá osoba v klidu produkuje asi 58 W/m^2 , to odpovídá hodnotě 1 met. Tato hodnota byla stanovena pro průměrného Evropana s plochou těla $1,8 \text{ m}^2$ [1]. Hustota metabolického tepelného toku byla zavedena zejména k lepšímu srovnávání a k eliminaci vlivu tělesné konstituce na výsledný tok. Plocha lidského těla je závislá na hmotnosti člověka a také na jeho výšce [2]. Přehled metabolických toků při různých aktivitách je uveden v obrázku 3.1.

Činnost	Hustota metabolického tepelného toku \dot{q}_m		Mechanická účinnost η
	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	[met]	
Klidné ležení	46	0,8	0
Sezení, uvolněné	58	1,0	0
Práce vsedě (úřady, školy, laboratoře)	70	1,2	0
Stání, lehká práce (nakupování, laboratoře, lehký průmysl)	93	1,6	0 až 0,1
Stání, střední práce (prodáváč, práce v domácnosti, práce na strojích)	116	2,0	0,1 až 0,2
Chůze po rovině $2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	110	1,9	0,1 až 0,2
Chůze po rovině $3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	140	2,4	0,1 až 0,2
Chůze po rovině $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	165	2,8	0,1 až 0,2
Chůze po rovině $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	200	3,4	0,1 až 0,2
Těžká fyzická práce (těžký průmysl, stavebnictví) přenášení břemen 50 kg	235	4,0	0,1 až 0,25

1 met = $58,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

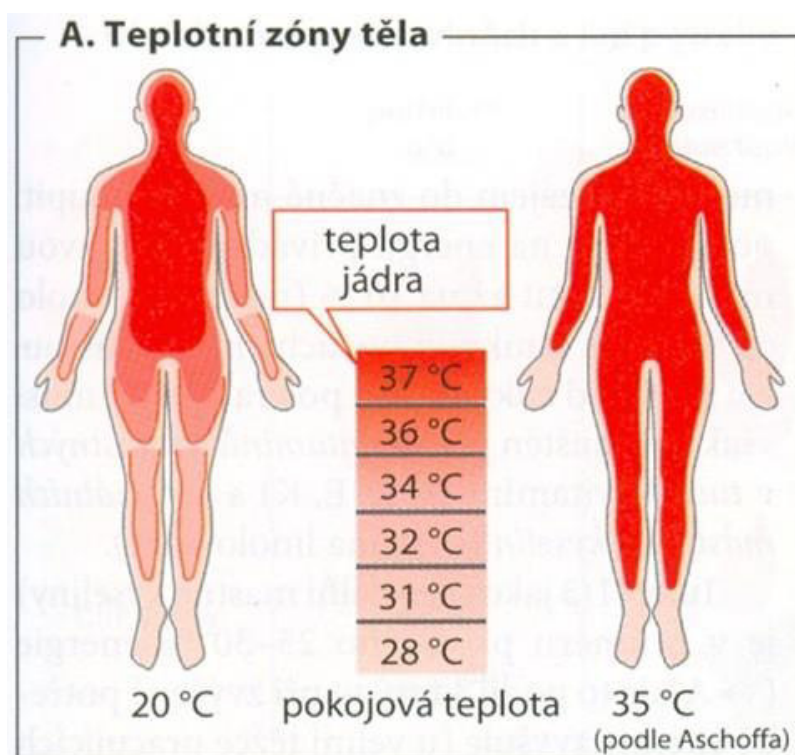
Obr. 3.1 Přehled metabolických tepelných toků [2]

Energie vzniká v lidském těle z přijaté potravy a z práce svalů. Pro biochemické přeměny je nezbytný kyslík, který se do těla dostává dýcháním. Množství přijatého kyslíku a tedy i množství produkovaného tepla je závislé na činnosti, kterou člověk vykonává. Při fyzické námaze je třeba dodat orgánům větší množství kyslíku, to vede k zintenzivnění procesu dýchání. V těle dochází k roztažení cév a většímu průtoku krve, to má za následek růst teploty v jádru. Aby nedošlo k přehřátí organismu a byla udržena konstantní teplota pro správnou funkci těla, $36,5 \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, je nutné teplo z těla odvést [2].

3.2.2 Termoregulace

Lidské tělo správně funguje při udržování konstantní teploty okolo 36°C , mozek je přizpůsoben pro práci při teplotě asi $36,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a pokud dojde k vyššímu překročení této teploty, nastává poškození mozku, srdečním arytmií a dalším komplikacím. Lidský organismus však disponuje termoregulačním systémem, jehož řídicí centrum se nachází v části mozku zvané hypotalamus [1]. Hypotalamus dostává signály jednak z receptorů na lidské kůži a jednak určuje lidskou teplotu podle termoreceptorů uvnitř lidského těla. Pokud mozek vyhodnotí, že standardní přenos tepla není schopen zajistit vhodné teplotní rozsahy pro práci orgánů, přejde tělo k aktivní termoregulaci, tj. k zvyšování či snižování tělesné teploty [1], [3].

Teplota lidského těla je silně závislá na okolních podmínkách, funkce hypotalamu je především zajistit co možná nejkonstantnější teplotu v jádře člověka. Vliv okolní teploty na rozložení teplot v lidském těle je patrný z obrázku 3.2 [6].



Obr. 3.2 Teplotní zóny lidského těla [6]

- **Reakce těla v teplém/horkém prostředí**

Ke snižování teploty pokožky dochází, nachází-li se člověk v prostředí o vysoké teplotě vzduchu nebo vysoké střední radiační teplotě. Snížením teploty povrchu dochází k teplotní diferenci mezi horkým jádrem a pokožkou a k odvodu tepla z těla člověka.

Vasodilatace je proces, při kterém dochází k rozšíření cév a většímu průtoku krve i do okrajových částí těla. Rozšíření cév zintenzivní přestup tepla z jádra do pokožky až 8x. Tím se zvýší teplota pokožky a dochází k intenzivnějšímu přestupu tepla mezi pokožkou a okolím (zvedne se teplotní gradient). Vasodilatace slouží hlavně k odvodu tepla z jádra těla směrem k pokožce a uplatňuje se jako předstupeň mokrého pocení [3], [6].

Pocení je obranný mechanismus lidského těla proti nadměrné okolní teplotě. Slouží k odvodu tepla z pokožky do okolního prostředí. Tento proces je také nazýván vypařovací termoregulace nebo mokré pocení. Při přehřátí organismu začne tělo produkovat pot (voda s obsahem minerálních látek a močoviny), který se následně v teplém prostředí odpařuje a ochlazuje tak pokožku [2]. Tím je zajištěno i ΔT mezi tělesným jádrem a pokožkou, což umožňuje odvádět vznikající metabolické teplo a zabráňuje tak přehřátí vnitřních orgánů a vzniku hypertermie [3].

- **Reakce těla v chladném/studeném prostředí**

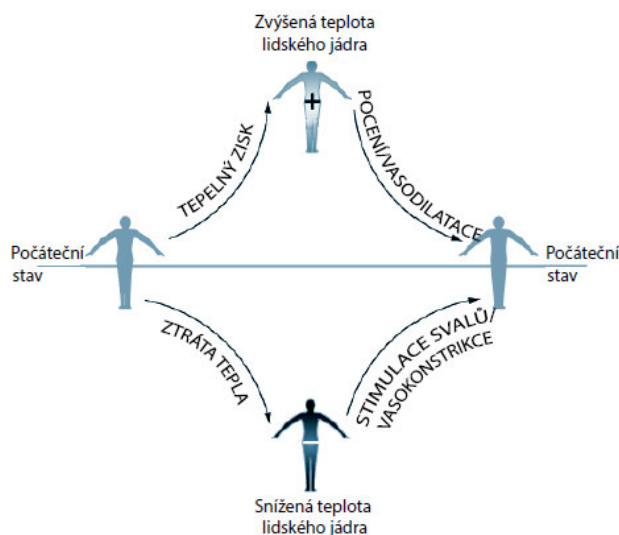
Pokud je okolní prostředí chladnější než lidské tělo dochází k odjímání tepla z pokožky a mozek vyhodnotí pocit chladu a začne používat následující obranné mechanismy.

Vasokonstrikce je stažení cév, které sníží průtok krve, tím se ochladí povrch těla a sníží se přestup tepla mezi okolím a pokožkou. Prvotním místem, odkud je krev stahována jsou okrajové části těla jako ruce a nohy, hypotalamus se především snaží ochránit životně důležité orgány v jádru člověka. Tento fakt je příčinou vzniku omrzlin při vystavení lidského těla extrémnímu chladu.

Svalový třes je nevědomá kontrakce svalových vláken, čímž dochází k produkci dodatečného metabolického tepla a zahřátí organismu. Tento způsob obrany proti chladu tedy nesnižuje tepelné ztráty, ale naopak intenzivně zvyšuje produkci tepla v lidském těle. Stahování svalových vláken není využito pro mechanickou práci, tvoří se tedy teplo. Svalový třes je subjektivním termoregulačním procesem, který záleží na toleranci jedince vůči chladu, významným faktorem je však množství podkožního tuku, který funguje jako izolace. Z toho vyplývá, že člověk s většími tukovými zásobami se vydrží třást déle, neboť má více zásob na spalování než člověk s menším % tělesného tuku. Obecně lze říct, že podkožní tuk chrání životně důležité orgány před prochladnutím [5].

Chemická termogeneze nastává v případě, je-li tělo vystaveno chladu po delší dobu. Jedná se o metabolickou termoregulaci, tj. zintenzivnění látkových přeměn v těle a tím zvýšení produkce tepla [2], [3]

V případě selhání podvědomých termoregulačních systémů lidského těla nebo v případě, že termoregulace není dostatečně intenzivní, dochází z přehřátí (hypertermie) či podchlazení (hypotermie) organismu. Uplatňuje se tedy i jiný proces, který navazuje pocit tepelné pohody a to tzv. vědomá termoregulace. Jedná se o procesy, které člověk vědomě ovlivňuje svým konáním/činností. Z výše uvedeného je patrné, že výměna tepla s okolím se uskutečňuje především přes pokožku, vhodným oděvem je tedy možné zabránit tepelným ztrátám či zisku z okolí. Dalším způsobem vědomé termoregulace je změna činnosti či změna polohy lidského těla tak, aby se zmenšila (zvětšila) plocha účastníci se tepelné výměny s okolím (člověk se schoulí, začne se ovívat-zvětší konvekci atd.) [2], [3].



Obr. 3.3 Termoregulace [4]

3.2.3 Vliv tepelné nepohody

Jak již bylo zmíněno, existuje několik faktorů, které ovlivňují tepelný komfort člověka. Cítí-li se člověk diskomfortně, má to vliv jak na psychiku/soustředění, tak na výkon práce a nikdy nebude dosahovat takové efektivity ve vykonávané činnosti, jako kdyby se nacházel v komfortním prostředí. V této kapitole se podrobněji zaměříme na vliv tepelné nepohody na řidiče automobilu.

Důležitým aspektem pro bezpečné řízení vozu je správné vizuální zachycení a vyhodnocení dopravní situace, pro což je nezbytnou podmínkou funkční zrak a správně pracující centrum kognitivních funkcí. Je známo, že pro řidiče automobilů je nezbytné dobré periferní vidění, kterým oko zaznamenává pohyb, aniž by musel člověk hlavu otáčet. Při vyšších teplotách (nad 30°C) v kabině vozu se zorný úhel periferního vidění zmenšuje (neboť klesá schopnost mozku vyhodnocovat a interpretovat vizuální informace z těchto oblastí) a to má za následek horší vnímání provozu ze strany řidiče [13].

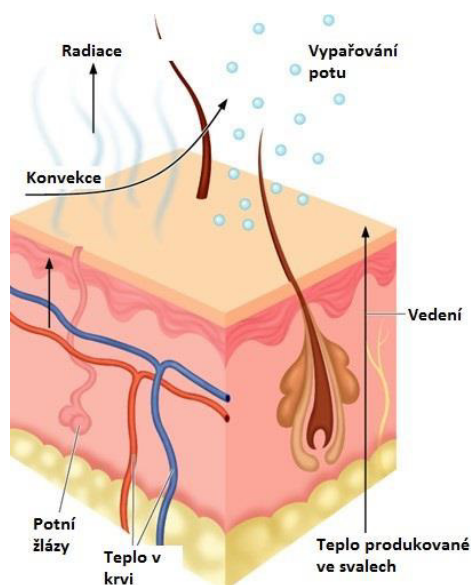
Se zvyšující se teplotou ve vozidle a zvětšující se vlhkostí dochází k pocitu nepohody na straně řidiče, což má většinou za následek agresivnější chování řidičů. Ze studií provedených ve Velké Británii D. Kendrickem a S. W. MacFarlanem vyplývá fakt, že vyšší teplota je přímo spjata s nepohodlím řidiče a tím i větší agresivitou, která negativně ovlivňuje soustředění a bezpečnost jízdy. Naopak řidiči ve vozidle s klimatizačním systémem, kteří se při jízdě cítili pohodlně, vykazovali standartní chování [14]. Vyšší teplota způsobuje i únavu, která vede k menší pozornosti a koncentraci, menší reakční rychlosti a může být příčinou mikrosnánku [15].

Stejně jako vysoká teplota má i nižší teplota negativní vliv na chování řidičů. Teplota menší než je komfortní je příčinou krátkodobého hypotermického stresu a ovlivňuje řidičské schopnosti. Řidiči se stávají nepozornějšími, jejich reakční schopnosti se snižují a dochází k méně plynulé jízdě (prudší brždění a rozjezd). Čím je pocit chladu intenzivnější, tím chování agresivnější a nebezpečnější [16].

Z výše uvedeného je zřejmé, že pohybují-li se teploty mimo komfortní zónu, tj. jsou nižší anebo vyšší, dochází ke snížení jízdních dovedností řidiče. Lidské tělo je nastaveno na práci při určitém teplotním rozmezí (viz kapitola 3. 2. 2.), při kterém pracuje efektivně. Mimo tuto oblast je člověk ve fyzické nepohodě, což nepříznivě ovlivňuje člověka psychicky. Cítí-li se člověk psychicky negativně, není schopen stejných reakcí ani pozornosti, jakoby byl v psychické rovnováze. Je tedy účelné snažit se zajistit, co možná nejúčinnější klimatizační a tepelný systém ve voze, který by v co nejkratším časovém intervalu eliminoval vlivy příliš chladného či teplého prostředí nastávající v zimních či letních měsících.

3.3 Interakce lidského těla s okolím

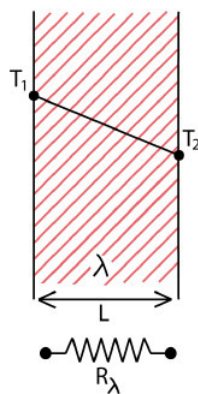
K výměně tepla s okolím dochází u člověka pomocí 4 základních mechanismů, jako je vedení, konvekce, radiace (záření) a vypařování potu (viz obr. 3.4). Bezesporu mezi další způsoby přenosu tepla patří také dýchání, tím se ale vzhledem k tématu práce nebudeme dále zabývat [4].



Obr. 3.4 Přenos tepla z lidského těla [6]

3.3.1 Přenos tepla kondukcí

Vedení tepla je proces, který se odehrává na molekulární (atomární) úrovni. Jedná se o interakci částic mezi sebou. Je charakteristický přenosem energie z částic energeticky bohatších k částicím energeticky chudším. Směr toku energie je dán teplotním gradientem, přenos tepla se uskutečňuje ve směru klesající teploty, tedy teplejší povrchy předávají energii chladnějším. Na obrázku 3.5 je znázorněna rovinná stěna s různými teplotami povrchu na obou stranách, vzniká tedy teplotní rozdíl, který umožňuje přenos tepla vedením přes konstrukci stěny [4], [7].



Obr. 3.5 Vedení tepla rovinnou stěnou [4]

U člověka nastává výměna tepla vedením při kontaktu pokožky s okolními předměty (židle, sedadlo automobilu, volant a jiné). Vzduch je považován za tepelný izolant, tudíž vedení při kontaktu pokožky se vzduchem lze zanedbat. Tepelný tok vedením bývá ve většině případů podstatně menší než konvekcí, avšak v kabině vozu se velká část povrchu lidského těla dotýká sedadla, proto nelze kondukcí zanedbat. Kondukcce hraje také významnou roli, při prostupu tepla přes oblečení, které je v těsném kontaktu s povrchem lidského těla. Nesmíme také opomenout zásadní roli tepelného odporu obuvi, která se dotýká podlahy a kde dochází k podstatnému přenosu tepla vedením [3], [4].

Přenos tepla nastává, existuje-li teplotní gradient mezi dotýkajícími se povrchy a řídí se podle Fourierova zákona, který zní: **Měrný tepelný tok \dot{q} přenášený vedením v nějaké látce je přímo úměrný velikosti teplotního gradientu a má opačné znaménko než tento gradient** [7].

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad [W/m^2] \quad (3.1)$$

Znaménko ve vztahu (3.1) bylo zavedeno z důvodu dodržení 2. zákona termodynamiky, tj. teplo samovolně proudí z místa o vyšší teplotě do místa s nižší teplotou. Proces přenosu tepla bude objasněn na příkladu rovinné stěny, kde nastává 1D vedení tepla, proto odpadá problém se znaménkovou konvekcí a je možné psát [7]:

$$\dot{q} = \lambda \frac{\Delta T}{\delta} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta} \quad [W/m^2] \quad (3.2)$$

Kde:

\dot{q} měrný tepelný tok [W/m^2]

λ součinitel tepelné vodivosti [$W/m.K$]

T_1 teplota na povrchu jedné strany [K]

T_2 teplota na povrchu druhé strany stěny [K]

δ tloušťka stěny [m]

Zavedeme-li jmenovatel jako podíl tloušťky a tepelné vodivosti, potom v čitateli zbyde pouze rozdíl teplot, následně lze najít analogii s Ohmovým zákonem a skládáním odporů. Vyjádříme-li člen $\frac{\delta}{\lambda}$ jako odpor vrstvy proti vedení tepla značen R_λ , potom je možné psát rovnici ve tvaru:

$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{T_1 - T_2}{R_\lambda} \quad [W/m^2] \quad (3.3)$$

V případě složené stěny z n vrstev použijeme analogii s Ohmovým zákonem a řazením odporů, obecně tedy platí [7]:

$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_\lambda} \quad [W/m^2] \quad (3.4)$$

3.3.2 Proudění (konvekce)

K přenosu tepla dochází vlivem pohybu tekutiny kolem nějakého povrchu, v našem případě se jedná o pohyb vzduchu kolem člověka. V kabině vozu se jedná o dominantní způsob výměny tepla z lidského těla. Rozlišujeme dva typy konvekce a to přirozenou, která nastává v důsledku rozdílu hustot (teplotní rozdíl), a nucenou, kdy je proudění vyvoláno působením externích sil, které zvyšují hybnost/rychlost proudění vzduchu (např. použitím ventilátoru).

Obecně se přestup tepla konvekcí řídí dle Newtonova ochlazovacího zákona:

$$\dot{q} = \alpha(T_w - T_a) \quad [W/m^2] \quad (3.5)$$

Kde:

\dot{q} měrný tepelný tok $[W/m^2]$

α součinitel přestupu tepla $[W/m^2K]$

T_w teplota povrchu obtékaného tělesa $[K]$

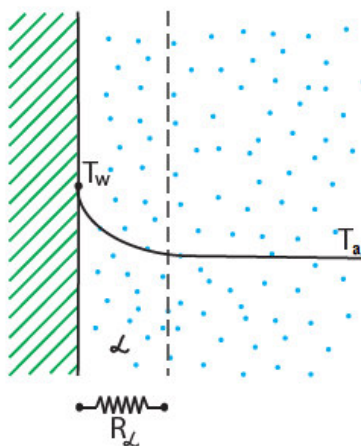
T_a teplota okolního vzduchu $[K]$

Po úpravě tak, aby byl v pravé části rovnice (3.5) v čitateli pouze rozdíl teplot, obdržíme vztah, v němž figuruje měrný tepelný odpor proti konvekci značený R_α [7].

$$\dot{q} = \frac{T_w - T_a}{\frac{1}{\alpha}} = \frac{T_w - T_a}{R_\alpha} \quad [W/m^2] \quad (3.6)$$

Velikost celkového tepelného toku je závislá především na hodnotě součinitele přestupu tepla α . Ten je ovlivněn mnoha faktory jako je charakter proudění (laminární, turbulentní), vlastnosti tekutiny, způsob obtékání. Hodnotu součinitele tepla obdržíme na základě podobnostních kritérií jako je Reynoldsovo, Prandltovo, Nusseltovo a Grashofovo číslo nebo empiricky dle daného případu [3].

Při přenosu tepla konvekcí se vytváří v blízkosti povrchu tepelná a rychlostní mezní vrstva, která má vliv na součinitel přestupu tepla (viz obr. 3.6). Po překonání hranice mezní vrstvy se dostaneme do oblasti volného proudu. Podmínky v mezní vrstvě silně ovlivňují velikost teplotního gradientu a určují také celkový tepelný tok mezní vrstvou. Na změně teplotního gradientu v mezní vrstvě je závislý součinitel přestupu tepla α . Z výše uvedeného vyplývá, že součinitel přestupu tepla podél obtékaného povrchu klesá a tím i celkový přenášený tepelný tok, je tedy vhodné tepelnou vrstvu rozbíjet pomocí různých nerovností na obtékané ploše [7].



Obr. 3.6 Přenos tepla konvekcí [4]

3.3.3 Záření (radiace)

Přenos tepla radiací je jediným procesem přenosu tepla, který nevyžaduje přítomnost hmotného přenosového média, může tedy probíhat i ve vakuu. Má-li povrch nějakou konečnou teplotu, je z něj emitována energie, tento proces se nazývá tepelné záření. Spolu s konvekcí se radiace nejvíce podílí na výměně tepla mezi člověkem a okolím [4], [7].

Celkový tepelný tok vyzářený z povrchu obdržíme použitím Stefan-Bolzmanova zákona. Tento vztah platí pouze pro absolutně černé těleso.

$$\dot{q} = E_0 = \sigma T^4 \quad [W/m^2] \quad (3.7)$$

Kde:

E_0 zářivost černého tělesa $[W/m^2]$

σ Stefan-Bolzmanova konstanta, $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$

T teplota povrchu černého tělesa $[K]$

Radiace je složitý proces, který v případě šedých těles závisí na jejich emisivitě, úhlových faktorech (vzájemné geometrické uspořádání těles) a velikosti povrchu. Rozlišujeme mezi vyzářeným tepelným tokem a přijatým tepelným tokem, ten je ovlivněn reflektancí r , absorptancí a a transmitancí t tělesa. Podle 1. Kirchhoffova zákona optiky platí, že součet reflektance, absorptance a transmitance je roven 1. Pro většinu pevných netransparentních těles platí, že transmitance je nulová. Jelikož lze radiaci zahrnout do celkového tepelného odporu oděvu a samostatné určování jednotlivých toků by bylo velice

obtížné, nebude tento způsob přenosu tepla dále rozvíjen, protože není předmětem této práce. Více informací lze nalézt v [7].

3.3.4 Vypařování potu

Evaporace neboli vypařování je zvláštní případ konvekce s fázovou přeměnou. Pot se dostává z těla na povrch, a pokud není okolní vzduch nasycen, dochází k odpařování a tím ochlazuje lidské pokožky. Aby se mohla uskutečnit látková přeměna skupenství, je třeba dodat latentní teplo výparné. Za normálních podmínek činí přenos tepla vypařováním (tzn. suché pocení) asi 25 % z celkového přenosu tepla z lidského těla. Nachází-li se člověk v extrémních podmínkách, tj. v extrémním horku, je to jediný účinný způsob, jak ochladit lidské tělo a zabránit přehřátí organismu. Vypařování je možné popsat jako princip difuze, který se řídí 1. Fickovým zákonem, který říká, že rychlost difuze je dána látkovým množstvím, které projde plochou za určitou časovou jednotku. Celková ztráta vypařováním je závislá na rozdílu parciálních tlaků nasycených vodních par na pokožce a vodních par v okolním vzduchu [3].

3.3.5 Tepelný odpor oděvu

Z výše uvedených způsobů přenosu tepla z lidského těla je patrné, že oblečení bude fungovat jako přídavný odpor při přenosu tepla z povrchu těla. Mezi oblečením a lidským tělem se nachází vždy malá vrstvička vzduchu, kde se bude uskutečňovat přenos tepla pomocí konvekce, dále bude docházet k přenosu tepla přes konstrukci oblečení a následně se teplo šíří do okolního prostředí jedním z výše uvedených způsobů, nejčastěji však konvekcí a radiací.

Budeme-li uvažovat případ zcela neoblečeného člověka, přenášelo by se teplo do okolí konvekcí a radiací dle vztahu (3.8). Pro další odvozování bude případ neoblečeného člověka označen indexem „n“. V dalším textu budou měrné tepelné odpory označovány pouze jako tepelné odpory. Rovnice (3.8) vyjadřuje kombinovaný tepelný tok konvekcí a radiací z pokožky člověka. Teplota T_p je teplota pokožky a T_a střední radiační teplota okolí. Jmenovatel vyjadřuje kombinovaný tepelný odpor konvekcí a radiací.

$$q_n = \frac{T_p - T_a}{R_\alpha} \quad [W/m^2] \quad (3.8)$$

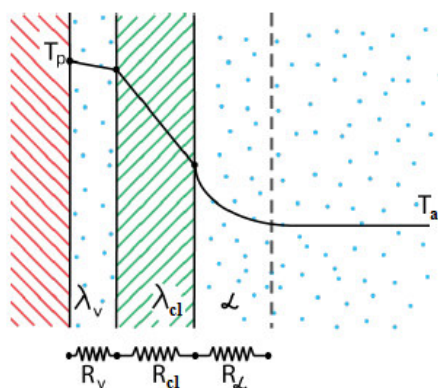
V případě oblečeného člověka funguje oblečení jako další odpor proti prostupu tepla. Vezmeme-li v úvahu těsné přiléhání oděvu k pokožce, šířilo by se teplo přes oděv vedením a dále do okolí konvekcí a radiací. Tuto variantu budeme značit indexem „o“. Tento případ je však v praxi nedosažitelný. I kdyby byl oděv ušit na míru, kolem těla bude vždy vznikat malá vzduchová vrstva, která působí jako další tepelný odpor. K přenosu tepla bude tedy docházet dle rovnice:

$$q_o = \frac{T_p - T_a}{R_\alpha + R_{cl} + R_v} \quad [W/m^2] \quad (3.9)$$

Kde:

R_{cl} tepelný odpor oděvu [$m^2 \cdot K/W$]

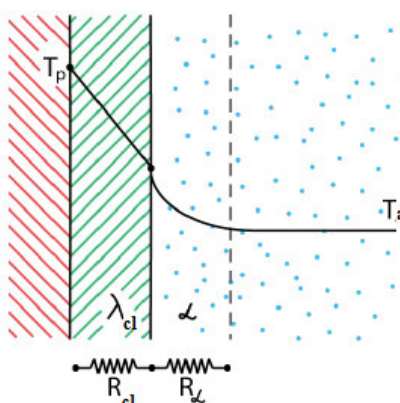
R_v tepelný odpor vzduchové vrstvičky [$m^2 \cdot K/W$]



Obr. 3.7 Prostup tepla přes jednotlivé vrstvy oblečeného člověka [4]

Vzduchová vrstvička je součástí všech oděvů, avšak námi dostupnými měřicími přístroji nejsme schopni její vliv měřit. Poněvadž se nachází v každém oděvu, je možné její vliv zahrnout do celkového tepelného odporu oděvu [8]. Vzduchovou vrstvu tedy dále uvažujeme jako součást materiálu oděvu. Pro výpočet lze použít následující rovnici:

$$\dot{q}_o = \frac{T_p - T_a}{R_\alpha + R_{cl}} \quad [W/m^2] \quad (3.10)$$



Obr. 3.8 Zjednodušené schéma prostupu tepla přes oblečení [4]

Tepelné odpory ve jmenovateli je možné shrnout do jednoho celkového tepelného odporu R_T .

$$R_T = R_\alpha + R_{cl} \quad [m^2 \cdot K/W] \quad (3.11)$$

Dosazením rovnice (3.11) do vztahu pro tepelný tok oblečeného člověka a následným vyjádřením celkového odporu dostaneme rovnici (3.12).

$$R_T = \frac{T_p - T_a}{\dot{q}_o} \quad [m^2 \cdot K/W] \quad (3.12)$$

Při měření tepelného odporu oděvu se měří teplota povrchu T_p , teplota okolí T_∞ a celkový tepelný tok \dot{q} . Pokud je naší snahou vypočíst samostatný tepelný odpor oděvu, nikoli celkový odpor, potom je nezbytné znát hodnotu tepelného odporu proti konvekci R_α , který vyjádříme ze vztahu (3.8).

$$R_{\alpha} = \frac{T_p - T_a}{\dot{q}_n} \quad [m^2 \cdot K/W] \quad (3.13)$$

Vztah (3.11) upravíme do požadovaného stavu, tak aby byl přímo vyjádřen tepelný odpor oděvu.

$$R_{cl} = R_T - R_{\alpha} \quad [m^2 \cdot K/W] \quad (3.14)$$

Dosazením za R_T a R_{α} z rovnic (3.12) a (3.13) do rovnice (3.14) obdržíme tvar pro výpočet tepelného odporu oděvu. Při praktickém měření může dojít k rozdílu naměřených teplot, proto do rovnice zavádíme indexy „n“ a „o“, aby nedošlo k chybné interpretaci vztahu [4].

$$R_{cl} = \frac{T_{op} - T_{oa}}{\dot{q}_o} - \frac{T_{np} - T_{na}}{\dot{q}_n} \quad [m^2 \cdot K/W] \quad (3.15)$$

Uvedené vztahy jsou platné pro přirozené proudění, při nucené konvekci bychom museli použít vztahy z normy. Jak již bylo uvedeno výše, byla zavedena také jednotka clo, která slouží k lepšímu porovnávání tepelných odporů mezi sebou. 1 clo odpovídá typickému mužskému obleku ze začátku 20. stol (kalhoty, košile s dlouhým rukávem, vesta, sako) a je rovna hodnotě 0,155 $m^2 \cdot K/W$. Vztah mezi veličinou I a tepelným odporem je definován dle rovnice (3.16) [1].

$$R = 0,155 I \quad [m^2 \cdot K/W] \quad (3.16)$$

3.4 Hodnocení tepelné pohody

V této kapitole budou uvedeny základní stupnice tepelného komfortu a bude objasněna myšlenka, která vedla k jejich vzniku. Celá kapitola byla volně převzata a přeložena z [10].

Stupnice tepelného komfortu se řadí mezi subjektivní metody. Jejich výhodou je relativně snadné použití i v případě, že nejsou zcela známy všechny faktory ovlivňující výsledek. Tyto stupnice mají ovšem i řadu nevýhod. Je velmi obtížné navrhnout přesné slovní formulace jednotlivých stupňů, které by jednoznačně vystihovaly daný tepelný komfort. Hlavním problémem se však ukázalo subjektivní hodnocení jednotlivých osob, neboť různí lidé pociťují různý tepelný komfort při stejných podmínkách a jejich hodnocení se od sebe mohou značně lišit. Proto je pro tuto metodu vyžadováno použití reprezentativní skupiny osob (dostatečné množství) ve zkoumaném prostředí, což může být velmi časově i finančně náročné.

- **Bedfordova stupnice**

Tato stupnice vyšla z průzkumu, který provedl v roce 1936 Bedford mezi pracovníky lehkého průmyslu. Pracovníci byli dotazováni ohledně svého tepelného komfortu na pracovišti, souběžně s dotazníkem byla provedena i klimatická měření. Výzkum probíhal na několika pracovištích a byl omezen pouze na zimní měsíce, kdy bylo v provozu vytápění. Většina testovaných osob při práci seděla a měření byla opakována. Do testovaných osob byly zahrnuty i ženy. Obdržené výsledky se velmi různily a na jejich základě byla zhotovena stupnice se sedmi třídami.

Tab. 3.1 Bedfordova stupnice tepelného komfortu [10]

Hodnota	Anglický název	Český název
1	Much too warm	Příliš teplo
2	Too warm	Nepříjemně teplo
3	Comfortably warm	Příjemně teplo
4	Comfortable	Příjemně
5	Comfortably cool	Příjemně chladno
6	Too cool	Nepříjemně chladno
7	Much too cool	Příliš chladno

Je třeba poznamenat, že jednotlivé kroky pocitové stupnice neindikují stejně velké intervaly pocitu. Bedford určuje komfortní oblast jako oblast, kde se 70 % dotazovaných cítilo „příjemně“ a v tomto výběru leželo nejméně 86 % hlasů mezi „příjemně chladno“ a „příjemně teplo“.

- **ASHRAE stupnice**

Z výzkumu Rohleho v roce 1971 na 1600 studentech, kdy zkoumal vztah mezi komfortem, teplotou, vlhkostí vzduchu, pohlavím a dobou expozice na daném místě, vyšla ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers) stupnice s rozsahem od -3 do +3. Jako základní bod se bere pocit „příjemně“, který byl označen jako 0. Stupnice je na rozdíl od Bedfordovi symetrická kolem nuly a kladné hodnoty korespondují s pocitem tepla, zatímco záporné s pocitem chladu. Tento fakt má za následek snadnější orientaci ve stupnici, jak pro dotazované osoby, tak pro vyhodnocení tepelného komfortu.

Tab. 3.2 ASHRAE stupnice tepelného komfortu [10]

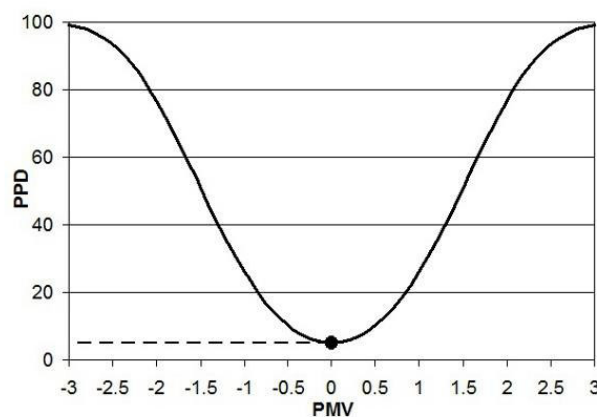
Hodnota	Anglický název	Český název
+3	Hot	Horko
+2	Warm	Teplo
+1	Slightly warm	Mírně teplo
0	Comfortable	Příjemně
-1	Slightly cool	Mírně chladno
-2	Cool	Chladno
-3	Cold	Zima

ASHRAE stupnice určuje oblast tepelného komfortu tam, kde 80 % sedících nebo lehce aktivních osob shledává prostředí teplotně vyhovující. Rozlišuje také komfortní zóny pro zimní měsíce a pro letní měsíce v závislosti na tepelném odporu běžného oblečení v tomto období (0,5 clo pro léto a 0,9 clo pro zimu) [1].

- **PMV stupnice**

Určuje střední tepelný pocit velké skupiny lidí na stejném psycho-fyzickém pocitovém měřítku jako ASHRAE stupnice, tj. od -3 do +3. Princip této metody je založen na tepelné rovnováze lidského těla, člověk je v tepelné rovnováze, když teplo produkované tělem člověka je rovno teplotě odváděnému do okolního prostředí. Je tedy možné PMV (predicted mean vote) vypočítat z energetického výdeje, tepelného odporu oblečení a z podmínek panujících v okolním prostředí (teplota, rychlost proudění, vlhkost atd. [2], [11]).

Ukazatel PMV udává střední hodnotu tepelného pocitu skupiny lidí, tato střední hodnota je ovšem výrazem pro všeobecný stupeň pohody/nepohody pro skupinu jako celek. Individuální pocity jsou rozloženy kolem této střední hodnoty, je proto užitečné zavést ukazatel PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), který udává procento osob nespokojených s danými tepelnými podmínkami. Do 5 % procent nespokojených uvažujeme tepelnou pohodu, do 20 % pak jsou podmínky přijatelné. Hodnoty PMV a PPD jsou vzájemně svázány grafem, viz obr. 3.9 [2], [11].



Obr. 3.9 Graf závislosti PPD na PMV [11]

• MTV stupnice

Hodnocení tepelné pohody dle MTV vyšlo z měření tepelného toku pomocí tepelných manekýnů a jejich porovnání s pocity testovaných osob. Byly provedeny série měření s manekýny při 30 různých klimatických podmínkách a do experimentu se zapojilo 20 dobrovolníků. Individuální pocity byly zprůměrovány pro jednotlivé podmínky a označeny jako střední tepelný pocit-MTV (mean thermal vote). Následně byl pomocí lineární regresivní analýzy MTV porovnán s ekvivalentní teplotou t_{eq} (pro všechny podmínky) a byla zjištěna vysoká korelace mezi segmentem tepelného toku a MTV pro stejnou část těla. Tatáž operace byla provedena na všech 16 zkoumaných segmentech lidského těla. Ekvivalentní teplota dobře koresponduje se středním tepelným pocitem a určuje tedy komfortní zónu.

Tab. 3.3 MTV stupnice tepelného komfortu [10]

Hodnota	Anglický název	Český název
+3	Much too hot	Příliš horko
+2	Too hot	Horko
+1	Hot but comfortable	Teplo ale příjemně
0	Neutral	Neutrální
-1	Cold but comfortable	Chladno ale příjemně
-2	Too cold	Zima
-3	Much too cold	Příliš zima

MTV stupnice je podobná ASHRAE stupnici, používá však jiné slovní definice jednotlivých pocitů a jejím hlavním cílem bylo ujasnit dotazované, že -1, 0, +1 jsou akceptovatelná (komfortní) hodnocení zatímco -2, -3, +2, +3 jsou neakceptovatelná (nekomfortní). Tento fakt nemusel být při použití ASHRAE stupnice zřetelný. Použití MTV stupnice je vhodné zejména při práci s tepelnými manekýny a díky své jednoznačnosti může přinést nejpřesnější hodnocení testovaných osob.

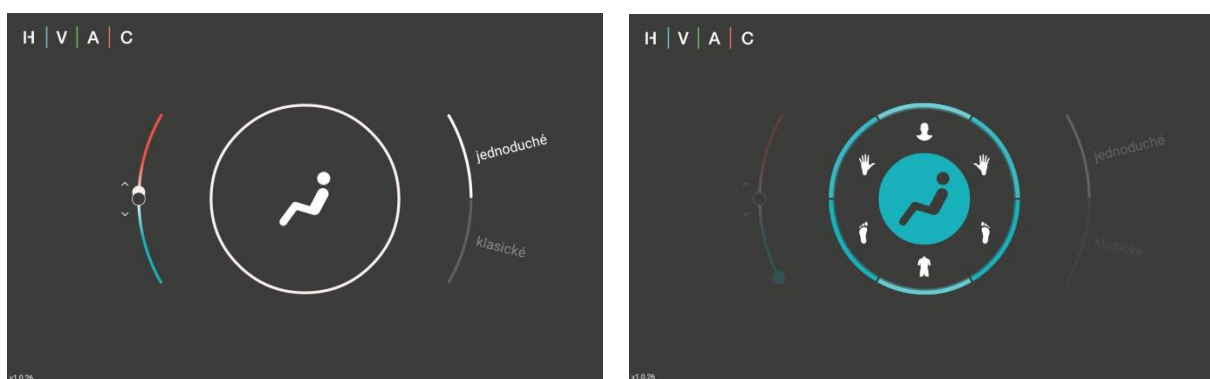
4 SYSTÉM HVAC

Označení systému HVAC pochází z anglického Heating, Ventilation and Air-Conditioning, v překladu topení, větrání a klimatizace. Jedná se o kombinaci technologií používanou především ve vnitřním prostředí zejména v kabinách vozů. Účelem HVAC je zajistit tepelný komfort při dobré kvalitě vnitřního vzduchu. HVAC je řízen systémově na základě snímaných dat pomocí senzorů [18].

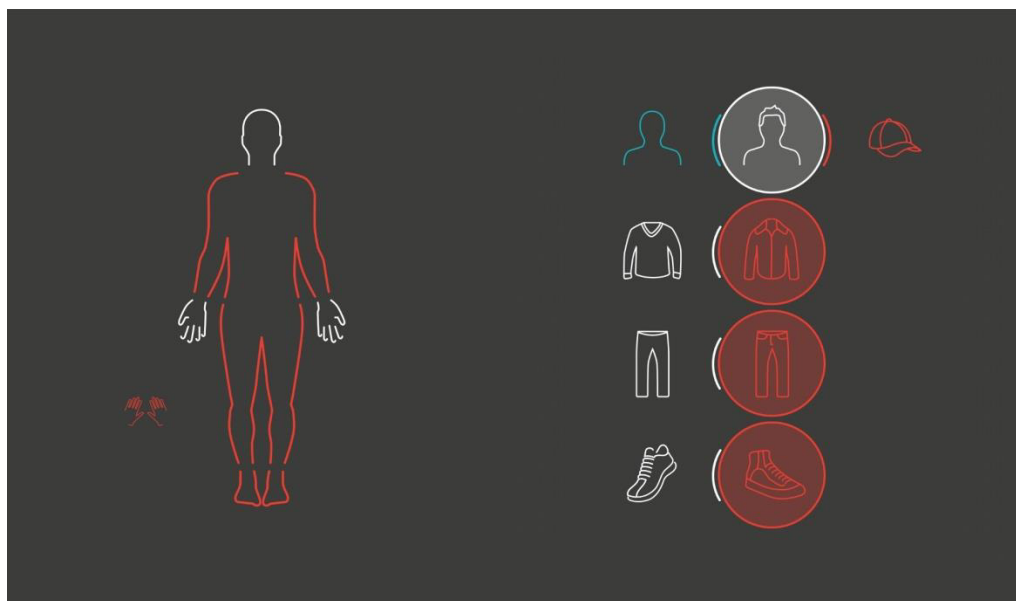
4.1 Systém iHVAC a jeho účel

Účelem této práce je doplnit poznatky o celkových tepelných odporech oblečeného člověka využívaných pro inovativní řízení iHVAC v rámci projektu „Inovativní řízení HVAC systému kabiny automobilu jako součást asistenčního systému řidiče“, který běží ve spolupráci VUT Brno a ŠKODA AUTO a. s. od roku 2014. Předpokládaný konec projektu je v roce 2017. Cílem spolupráce je vytvořit software, hardware, algoritmus a vizualizační systém pro snímání teplot kritických částí lidského těla tak, aby byl řidič včas upozorněn na možnost segmentové tepelné nepohody a mohl změnit nastavení klimatizačního systému pomocí dotykové obrazovky. Jedním z klíčových bodů projektu je tedy vytvořit přehlednou a jednoduchou vizuální interpretaci měřených dat [17].

Systém bude pracovat na základě určení ekvivalentní teploty s využitím dostupné databáze tepelných odporů R_T , z nichž následně vyhodnotí tepelný stav ve vozidle. Ekvivalentní teplota je zjištěna na základě plošných senzorů rozmístěných v kabině vozu. Data ze senzorů jsou pomocí aplikace vyhodnocena a řidiči je poskytnuta informace o globálním tepelném pocitu ve vozidle. Řidič tedy nedostává pouze informace o aktuální teplotě, ale také o tepelném pocitu jako celku i o tepelném pocitu na jednotlivých segmentech lidského těla. Klíčem k lepšímu energetickému managementu ve voze a lepší predikci tepelného komfortu je využití virtuálního šatníku, kde si může uživatel upravit přednastavený oděv podle svého aktuálního sezónního oblečení [19].



Obr. 4.1 Uživatelské rozhraní aplikace iHVAC [18]



Obr. 4.2 Nastavení virtuálního šatníku v aplikaci iHVAC [18]

4.2 Šatník pro systém iHVAC

Dle dostupných materiálů byla sestavena tabulka možných kombinací částí oděvů řidiče/pasažéra na hlavních anatomických částech těla a podle tohoto zónování pak byly přiřazeny segmenty na tepelném manekýnovi. Některé části se skládají z více samostatně měřitelných segmentů a jsou uvedeny v tabulce. Párové orgány jsou označeny L jako left (levý) a R jako pravý (right).

Tab. 4.1 Detailní přehled virtuálního šatníku

část těla	segmenty	oblečení			
hlava	vlasý	bez vlasů	vlasý	čepice	zimní čepice
	tvář				
torzo	hrudník	tričko	košile	svetr	zimní bunda
	záda nahoře				
	záda dole				
	L horní paže				
	R horní paže				
	L spodní paže				
	R spodní paže				
ruce	L ruka	bez rukavic		s rukavicemi	
	R ruka				
nohy	L stehno	kraťasy	sukně	kalhoty	
	R stehno				
	L lýtko				
	R lýtko				
chodidla	L chodidlo	sandály	tenisky	pevné boty	
	R chodidlo				

Jelikož měření všech možných kombinací by bylo velmi časově náročné a některá kombinace by postrádaly smysl (např. kraťasy + zimní bunda), byly na základě nejběžnějších preferovaných skladeb oděvů zvoleny základní kombinace pro zimní, letní a přechodné období. Tento výběr byl učiněn dle dat získaných dotazováním osob ohledně jejich typického oblečení v jednotlivých ročních obdobích. Uvedenou problematikou a dotazováním osob se podrobně zabývá bakalářská práce Róberta Tomy [12], jejíž výsledky byly použity jako vstupní parametr pro tuto práci. Tato práce slouží jako zdroj pro celou kapitolu 4.2 a nebude dále citována. Testovány byly jak muži, tak i ženy.

- **Léto**

Z dostupných výsledků je patrné, že v letním období je skladba oblečení pro obě pohlaví téměř totožná a skládá se z trička a kraťasů/sukně, jediný rozdíl byl v preferované obuvi. Zatímco ženy vyhledávají především otevřenou obuv (sandály), muži dávají přednost uzavřeným botám.

- **Přechodné období**

Kombinace nejčastějších oděvů pro muže a ženy v tomto období se opět rozcházel pouze v jedné části oděvu. Obě pohlaví nejčastěji zvolili kombinaci uzavřených tenisek, dlouhých kalhot a trička s krátkým rukávem. Ženy však nejčastěji oblékají na tričko ještě lehkou bundu, zatímco mužům postačí košile.

- **Zima**

Největší rozdíly v oděvu byly zaznamenány v zimním období, což patrně souvisí s větší citlivostí žen na chlad. Ženy se obecně v chladnějším prostředí oblékají tepleji než muži. Muži nejčastěji volí tričko s krátkým rukávem doplněné o mikinu, dlouhé kalhoty a pevné boty s ponožkami. Ženy naproti tomu oblékají o vrstvu více a to tričko, svetr a kabát. Zbytek sestavy zůstává nezměněn. Z dotazníků také vyplývá, že mnoho žen volí při řízení v zimním období také rukavice.

Z výsledků získaných dotazováním osob a z dostupného šatníku v aplikaci inovativního systému iHVAC bylo sestaveno pět kombinací oděvů, které budou přesně popsány v kapitole 6.1. Byly vybrány kombinace, které nejlépe vystihují běžný oděv řidiče pro dané období v podmínkách středoevropského mírného klimatu. Pro letní měsíce budeme zkoumat rozdíl mezi sukní a kraťasy, v přechodném období budeme uvažovat stejný oděv pro muže i ženy a v zimním období zhodnotíme vliv rukavic, čepice a teplé zimní bundy.

5 METODIKA MĚŘENÍ

Následující kapitola bude věnována přehledu normy ČSN EN ISO 15831 a ISO 14505-02, popisu dostupného měřicího zařízení a především návrhu metodiky měření pro určení tepelného odporu vybrané skladby oblečení pro systém iHVAC.

5.1 Norma ČSN EN 15831

Předmětem následující kapitoly je interpretace výše uvedené normy [8] a nebude v textu dále citována.

Metodika vyhodnocování tepelné izolace oděvů se řídí dle normy ČSN EN 15831- Oděvy – Fyziologické účinky – Měření tepelné izolace pomocí tepelné figuríny. Tato norma je překladem evropské normy z roku 2004.

Předmětem normy je popis požadavků na tepelného manekýna pro měření tepelného odporu oděvu R_{cl} pro relativně klidné prostředí, tj. uživatel sedí nebo se pohybuje. Oděvy se testují na manekýnovi tak, jak by byly reálně umístěny na lidském těle.

- **Požadavky na tepelnou figurínu**

Tepelný manekýn musí rozměrově odpovídat velikosti dospělého člověka. Manekýn je umístěn v klimakomoře a je vevnitř vyhříván na konstantní povrchovou teplotu pokožky. Tepelný tok je měřen po dosažení rovnovážných podmínek, tj. po stabilizaci tepelného manekýna. Z tepelného toku a rozdílu teplot pokožky a okolního ovzduší lze vypočítat tepelný odpor oděvu. Tento vztah (3.15) byl uveden výše v kap. 3.3.5. Získané hodnoty tepelných izolací v sobě zahrnují odpor vzduchové vrstvy mezi oblečením a figurínou a odpor oděvu.

Tepelná figurína musí disponovat minimálně 15 částmi, na kterých lze samostatně nastavit povrchovou teplotu a které jsou schopny měřit tepelný tok. Tělesná výška tepelného manekýna je $(1,7 \pm 0,15)$ m s plochou $(1,7 \pm 0,3)$ m². Manekýn je konstruován tak, že je pohyblivý v ramenních, kolenních a kyčelních kloubech.

Povrchová teplota všech neoblečených částí manekýna je nastavena na $(34 \pm 0,2)$ °C. Povrchové teploty musí být měřeny vhodnými snímači teploty, jejichž čidla nesmí vyčnívat více jak 0,5 mm nad povrch manekýna a musí být dobře připevněna mechanicky či tepelně. Nejvhodnější je vedení skrz manekýna.

Tepelný tok odcházející z těla figuríny přes oděv může být měřen na základě nezbytné dodávky energie k udržení konstantní teploty povrchu v daném časovém intervalu. Měřicí zařízení výkonu musí být schopné udávat přesnou průměrnou hodnotu po zkušební dobu s přesností ± 2 % hodnoty průměrné dodávky energie ke každému napájenému segmentu figuríny.

- **Klimatizační komora**

Klimatizační komora je uzavřená místnost o rozměrech minimálně $(2 \times 2 \times 2)$ m, kde lze nastavit teplotu vzduchu a regulovat rychlost proudění a vlhkost vzduchu. Proudění vzduchu může být vertikální či horizontální.

Jsou kladeny požadavky, které nesmí být překročeny do vzdálenosti 0,5 m od figuríny:

- a) Teplota vzduchu ± 1 °C
- b) Relativní vlhkost vzduchu ± 10 %
- c) Rychlost vzduchu ± 50 % střední hodnoty
- d) Teplota stěn, stropu a podlahy se nesmí lišit o více jak 1 K průměrné teploty vzduchu

Přechodné změny v komoře nesmí překročit následující hodnoty:

- a) Teplota vzduchu $\pm 0,5$ °C
- b) Relativní vlhkost vzduchu ± 10 %
- c) Rychlost vzduchu ± 20 % z průměrné hodnoty dat za 3 min

V klimatizační komoře musí být umístěna čidla teploty vzduchu s přesností $\pm 0,15$ °C a s časovou konstantou nepřesahující 1 min. Nejvhodnější je použití vícenásobných čidel. Čidla musí být umístěna ve vzdálenosti $(0,5 \pm 0,1)$ m od figuríny, jednotlivá čidla minimálně 1 m nad podlahou a vícenásobná čidla ve stejných odstupech. Data získaná z vícenásobných čidel se následně průměrují.

- **Postup zkoušky**

Zkoušené oděvy musí na tepelné figuríně přesně sedět, aby došlo k podmínkám co nejvíce podobným realitě. Oděv by se neměl před samotnou zkouškou prát či chemicky čistit, jelikož může dojít k ovlivnění výsledků. Pokud tak bylo učiněno, musí být použité chemické postupy popsány v protokolu. Oděv je nutné minimálně 12 hodin před začátkem zkoušky kondicionovat při stejných podmínkách jako budou panovat v klimatizační komoře nebo při teplotě (20 ± 5) °C a relativní vlhkosti vzduchu (50 ± 20) %.

Pro měření celkového tepelného odporu je manekýn nepohyblivý, stojí na nohách a ruce volně splývají podél těla. Povrchová teplota T_p všech segmentů figuríny je udržována během celé zkušební doby na $(34 \pm 0,2)$ °C.

V klimatizační komoře je nastavena teplota vzduchu T_a na takovou hodnotu, aby byl minimální tepelný tok v každé části 20 W/m^2 . Relativní vlhkost v komoře je udržována mezi 20 a 70 %, ideálně však 50 %.

Celkové měření musí trvat alespoň 20 minut, potom lze výslednou hodnotu tepelné izolace obdržet aritmetickým průměrováním dílčích hodnot.

5.2 Norma ČSN EN 14505-2

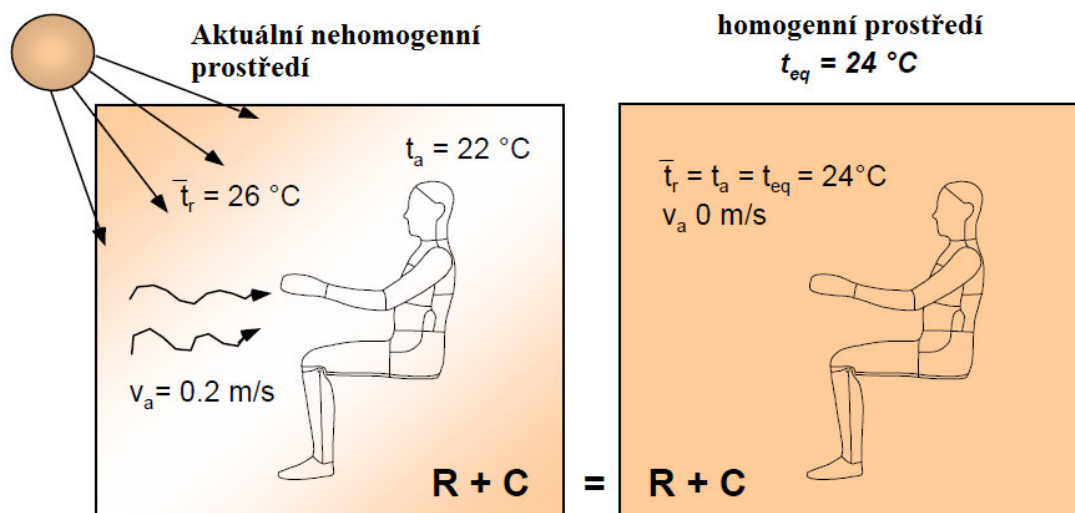
Zdrojem celé této kapitoly je výše uvedená norma [9] a nebude v textu dále citována.

Norma ČSN EN 14505 je překladem evropské normy z roku 2006. Vyhodnocování tepelného komfortu v kabinách s použitím tepelného manekýna se řídí dle normy Ergonomie tepelného prostředí - Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech (ČSN EN 14505). Norma odpovídá poznatkům, které uvedl ve své dizertační práci doktor Nilsson (viz [10]).

- **Princip ekvivalentní teploty**

V kabinách vozů dochází k vzájemnému ovlivňování tepelné výměny konvekci, radiací a kondukcí. Tento proces je způsobem vnější tepelnou zátěží v kombinaci se systémem chlazení či vytápění v kabině vozu. Vytváří se mikroklima, které může v prostoru a čase kolísat a vede k asymetrickým tepelným podmínkám, které jsou příčinou tepelné nepohody. Z tohoto důvodu byla zavedena ekvivalentní teplota, která umožňuje popsat asymetrické působení a zjednodušit vyhodnocení tepelného pocitu a komfortu.

Ekvivalentní teplota T_{eq} je definována jako teplota homogenního prostoru při střední radiační teplotě rovné teplotě vzduchu a nulové rychlosti proudění vzduchu, ve které osoba vymění stejnou tepelnou ztrátu konvekcí a radiací jako ve skutečných podmínkách. Na obrázku je patrné využití ekvivalentní teploty v praxi, zatímco v nehomogenním prostředí je člověk vystaven radiační teplotě i teplotě okolního vzduchu, v homogenním (standardním) prostředí jsou, za předpokladu stejných tepelných toků mezi manekýnem a okolím, tyto teploty nahrazeny jednou ekvivalentní teplotou.



Obr. 5.1 Princip ekvivalentní teploty [10]

Ekvivalentní teplota udává míru vlivu klimatu na tepelnou výměnu člověka. Hodnota ekvivalentní teploty určitého prostředí úzce souvisí s tím, jak člověk vnímá tepelné podmínky ve stejném prostředí. Hodnota T_{eq} může být tedy použita k vyhodnocení kvality prostředí.

Stanovení T_{eq} je založeno na rovnicích pro konvekční a radiační přestup tepla oblečené osoby. Přenos tepla kondukcí se neuvažuje, protože je v porovnání s konvekčním tokem zanedbatelný. V praxi vypočteme ekvivalentní teplotu ze vztahu:

$$T_{eq} = T_p - \frac{\dot{q}_o}{h_{cal}} \quad [K] \quad (5.1)$$

Kde:

T_p povrchová teplota [K]

\dot{q}_o měrný tepelný tok oblečeného člověka [W/m^2]

h_{cal} složený součinitel přenosu tepla určený při kalibrování ve standardním prostředí [$W/K.m^2$]

Zavedeme-li pojem tepelného odporu, potom platí:

$$R_T = \frac{1}{h_{cal}} \quad [m^2.K/W] \quad (5.2)$$

Standardní prostředí je takové, kde tepelné podmínky jsou homogenní a teplota vzduchu je rovna střední radiační teplotě $t_a = \bar{t}_r$ a rychlost proudění je menší než 0,1 m/s. Teplota povrchu manekýna T_p má být nastavena na $34^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$ a je nutná její kalibrace v klimakomůře. Součinitele přestupu tepla se stanoví při teplotě okolního vzduchu (ekvivalentní teplotě) $24^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$. Z důvodu nestálosti h_{cal} při kalibračních podmínkách, h_{cal} je závislé na rozdílu mezi teplotou v komoře T_{eq} a povrchovou teplotou T_p , je vhodné zavést tři ekvivalentní teploty (nejnižší, nejvyšší a 24°C). V případě použití komfortního vyrovnávání jako regulačního režimu je možné považovat h_{cal} v daném měřicím intervalu za konstantní a stanovení lze provést pouze při teplotě 24°C .

- **Diagram komfortních zón**

Na základě ekvivalentních teplot je možné definovat komfortní zóny, rovnice (5.3), které jsou uspořádány do komfortního diagramu. Každé ekvivalentní teplotě odpovídá pět komfortních zón (nepříjemně teplo, teplo ale příjemně, neutrálně, chladno ale příjemně, nepříjemně chladno). Komfortní diagramy byly sestaveny na základě subjektivního hodnocení podle stupnice MTV a vyjadřují interval preferované teploty pro dané prostředí, danou aktivitu a daný oděv. Pro různé oblečení obdržíme tedy odlišné komfortní diagramy. V ideálním případě by byla komfortní zóna definována průsečíkem ekvivalentní teploty a $MTV=0$, toho však nejde v praxi dosáhnout, proto byly jako limitní hodnoty pro neutrální oblast (komfortní oblast) určeny hodnoty -0,8 až +0,8 MTV. Toto rozmezí koresponduje s 80 % spokojených osob s lokálním tepelným pocitem. Hranice pro příjemně chladno a příjemně teplo byly stanoveny na -1,5 respektive +1,5. Index MTV menší než -1,5 značí příliš chladné prostředí, naopak je-li index MTV větší než +1,5 je dané prostředí příliš teplé. V diagramu komfortních zón tedy nalezneme doporučené hodnoty ekvivalentní teploty pro jednotlivé zkoumané segmenty lidského těla [10].

$$T_{eq} = T_p - R_T(b + c \cdot MTV) \quad [K] \quad (5.3)$$

Kde:

T_p teplota povrchu manekýna [K]

R_T celkový tepelný odpor [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]

b, c lineární regresní konstanty [W/m^2]

MTV střední tepelný pocit

5.3 Dostupné měřicí zařízení

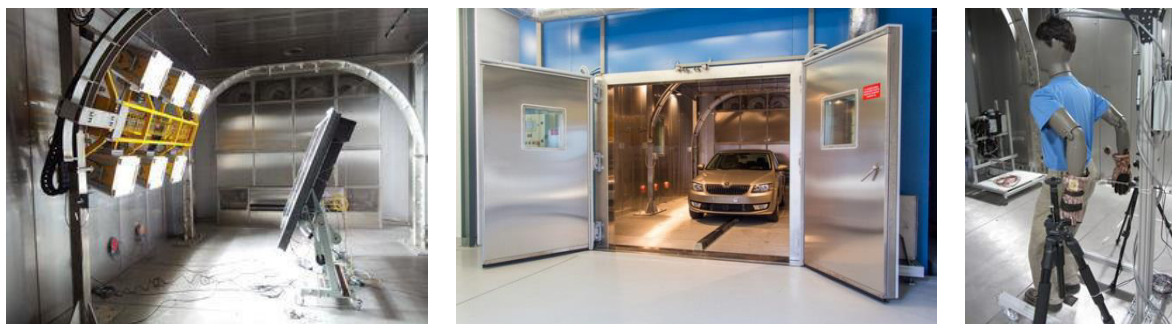
V následující kapitole bude popsáno dostupné měřicí zařízení na Fakultě strojního inženýrství, VUT v Brně (dále jen FSI VUT) použité pro měření tepelného odporu dle výše uvedených norem. Laboratoř tepelného komfortu disponuje klimatickou komorou, tepelným manekýnem Newtonem, mobilním systémem pro měření prostředí v automobilu, dále pak modelem kabiny malého dopravního letadla a v neposlední řadě se v laboratoři vyvíjejí různé softwarové modely [17]. Následující podkapitoly budou věnovány zejména prvním dvěma jmenovaným zařízením.

5.3.1 Klimatická komora

Klimatická komora je zařízení schopné simulovat okolní atmosférické podmínky, díky čemu je využívána pro testování průmyslových výrobků v různých klimatických vlivech.

Klimakomora slouží ke zkoušení automobilů, kabin dopravních prostředků, solárních systémů, chladicích zařízení, tepelných čerpadel a jiných průmyslových výrobků. Zkoumána je jednak životnost, ale také funkčnost za daných podmínek. V kombinaci s tepelným manekýnem slouží k testování tepelného komfortu osob [20].

VUT FSI v Brně disponuje klimakomorou od roku 2013. Zařízení pochází od firmy AngelAntoni Industrie S. P. A. Rozměry komory jsou 5 x 8,85 x 3,8 m, je tedy vhodná i pro zkoušení automobilů, jak je patrné z obrázku 5.2. V klimakoře je možné regulovat teplotu vzduchu i jeho vlhkost, k dispozici je také zařízení pro simulaci slunečního záření. Komora však nemá zařízení, které by bylo schopné nastavit teplotu stěn ani plynule řídit rychlost proudění vzduchu. Požadované rychlosti je docíleno pomocí přídavných zařízení instalovaných uvnitř klimakomory [20].



Obr. 5.2 Různé možnosti využití klimakomory [20]

Technické parametry klimatické komory:

- Teplotní rozsah (se solární simulací) -10 až +50 °C
- Teplotní rozsah (bez solární simulace) -50 až +85 °C
- Rychlost teplotní změny (IEC 60068-35-5) ± 1 °C
- Vlhkostní rozsah (se solární simulací) 30 až 60 %RH
- Vlhkostní rozsah (bez solární simulace) 30 až 95 %RH
- Stabilita udržování vlhkosti ± 5 %RH
- Rosný bod 5 až 49 °C
- Solární simulace 10 kW nebo 1000 W/m²
- Výměna vzduchu při větrání 3000 m³/h
- Výměna vzduchu při provozu 300 m³/h
- Vnitřní objem komory 155 m³

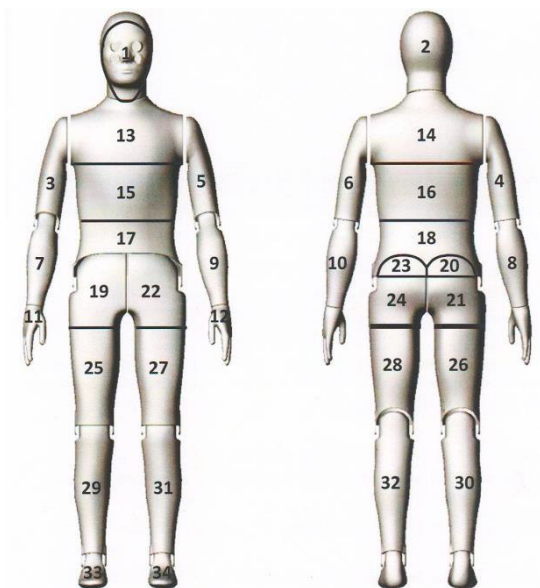
5.3.2 Tepelný manekýn Newton

Dalším klíčovým měřicím zařízením je tepelný manekýn Newton od americké společnosti Thermetrics (dříve Measurement Technology Northwest). Součástí manekýna je i řídicí software ThermDAC8, který slouží k nastavení požadovaných parametrů a zaznamenávání měřených dat, která lze v reálném čase sledovat jak numericky, tak i graficky. Software také umožňuje statistickou analýzu dat a zpětným zobrazením již proběhlých testů. Výsledky měření jsou ukládány do souboru formátu .csv, který obsahuje čárkami oddělené hodnoty a je snadno importovatelný do Excelu nebo jiného tabulkového programu [21].



Obr. 5.3 Tepelný manekýn Newton [21]

Tepelný manekýn na obrázku 5.4 má tvar průměrné lidské postavy a skládá se z 34 nezávisle kontrolovatelných částí. Všechny segmenty jsou samostatně vyhřívány tak, aby simulovaly produkované metabolické teplo, a jsou vybaveny senzory pro měření povrchové teploty. Měří se ztráty konvekcí, radiací a vedením ze všech zón a výsledkem je pak celková tepelná ztráta celého těla. Tepelný manekýn může být regulován buď na konstantní povrchovou teplotu povrchu, nebo na konstantní tepelný tok přes povrch manekýna anebo podle rovnice tepelného komfortu. Součástí manekýna je i dýchací zařízení s filtry, které umožňuje monitorování vdechovaných částic [21], [22].



Obr. 5.4 Segmenty tepelného manekýna [18]

Technické parametry měřicího zařízení [20], [21]:

- Měření v rozsahu okolní teploty -20 až +50 °C
- Přesnost měření teploty $\pm 0,1$ °C
- 2x čidlo teploty vzduchu (odporové)
- 1x čidlo relativní vlhkosti
- 1x čidlo pro měření rychlosti vzduchu- žárový kuličkový anemometr
- Dýchací mechanismus-frekvence vdechu 5-20 min⁻¹
- Filtrační zařízení pro monitoring vdechovaných částic

5.3.3 Měřicí přístroj TESTO

Jedná se o multifunkční přístroj pro analýzu okolního vzduchu. Možnosti jeho aplikace se liší podle typu připojených sond. Je schopen měřit rychlost proudění, teplotu, vlhkost, absolutní tlak, ale i intenzitu turbulence a množství CO₂. Některá typy sond jsou vhodné i pro měření ve výustkách a ve vzduchotechnickém kanále. Je možno měřit i pomocí bezdrátových radiových sond, najednou je přístroj schopen vyhodnocovat a zobrazovat data z maximálně tří radiových sond zároveň. Výsledky měření jsou dokumentovány pomocí programu ComSoft na PC, program je schopen zobrazovat graf, ale také tabulkový výpis hodnot [23]. Přístroj disponuje velkou kapacitou až 10 000 měřených hodnot, (režim datalogger), data lze však následně stáhnout do PC [24].



Obr. 5.5 TESTO [24]

Pro doplnění naměřených dat ze dvou čidel teploty, anemometru a vlhkoměru napojených na manekýna byla použita multifunkční sonda, připojená na přístroj TESTO 435, jedná se o termickou sondu pro měření proudění s integrovaným měřením teploty a vlhkosti. Toto měření bylo využito především z důvodu ověření homogennosti podmínek v okolí manekýna.

5.4 Návrh metodiky měření

Řídicí systém iHVAC vyhodnocuje tepelnou pohodu na základě celkového tepelného odporu oblečeného člověka R_T . Na základě dostupných norem a měřicích zařízení byla navržena následující metoda měření.

- **Popis experimentálního řešení**

Měření bude probíhat s využitím ekvivalentní teploty, která bude určována pro každý segment. Teplota povrchu tepelného manekýna T_p je dle normy [8] nastavena na $34 \pm 0,2$ °C. Měření pro klimatizační systémy v kabinách vozů má svá specifika a je vhodné zavést ekvivalentní teplotu T_{eq} . Dle dodatku C normy ČSN 14505-2 [9] je účelné měřit při třech kalibračních teplotách, při 24 °C a teplotě nižší a vyšší. Byly proto zvoleny tři teploty 20 °C, 24 °C a 28 °C, při kterých bude měření probíhat.

Tepelný manekýn není schopen měřit přímo součinitele přestupu tepla h_{cal} , ale zaznamenává tepelný tok z jednotlivých částí těla při udržování nastavené teploty T_p . Na základě měřených teplot povrchu figuríny T_p a okolního vzduchu T_a jsme schopni spočítat součinitele přestupu tepla, resp. celkový tepelný odpor R_T (rovnice 5.4). Tato hodnota bude použita k určení rozsahu ekvivalentní teploty pro komfortní zóny dle vztahu (5.1). Tato hodnota bude následně použita pro vygenerování diagramu komfortních zón dle rovnice (5.3).

$$h_{cal} = \frac{\dot{q}_o}{T_p - T_a} \quad [W/m^2K] \quad (5.4)$$

Hodnoty h_{cal} závisí na podmínkách měření, ale podle zákona termodynamiky by se neměly při různých teplotách příliš lišit. Zjištěné h_{cal} budou mezi sebou porovnány. Rychlost vzduchu je požadována menší než 0,1 m/s, nebude tedy stačit vypnout proudění v komoře zajišťované ventilátory, ale bude nutné použít kalibrační box, který zajistí klidné prostředí v okolí manekýna (viz Rozmístění a nastavení manekýna). Vlhkost vzduchu v komoře bude nastavena na 40 %.

Ze získaných informací o typické skladbě oblečení v různých ročních obdobích dle průzkumu Róberta Tomy [12] byly zvoleny základní kombinace oděvů (letní, zimní, přechodné), které budou měřeny při daných teplotách. Více o skladbě oděvu je uvedeno v kapitole 4.2.

- **Rozmístění a nastavení měřicího zařízení**

Tepelný manekýn je umístěn uprostřed klimakomory v poloze simulující sedícího člověka ve voze, tj. manekýn je zavěšen v sedící poloze s rukama před sebou, což napodobuje ruce položené na volantu (viz obr. 5.6). Aby bylo dosaženo dostatečně nízké rychlosti proudění (viz kapitola 5.2), bude manekýn umístěn v kalibračním boxu, který vyrobil kolega Ing. Miloš Fojtlín pro účely své diplomové práce [28]. Tato zástěna bude zajišťovat lepší udržení konstantních podmínek během měření a to především rychlost proudění do 0,1 m/s.

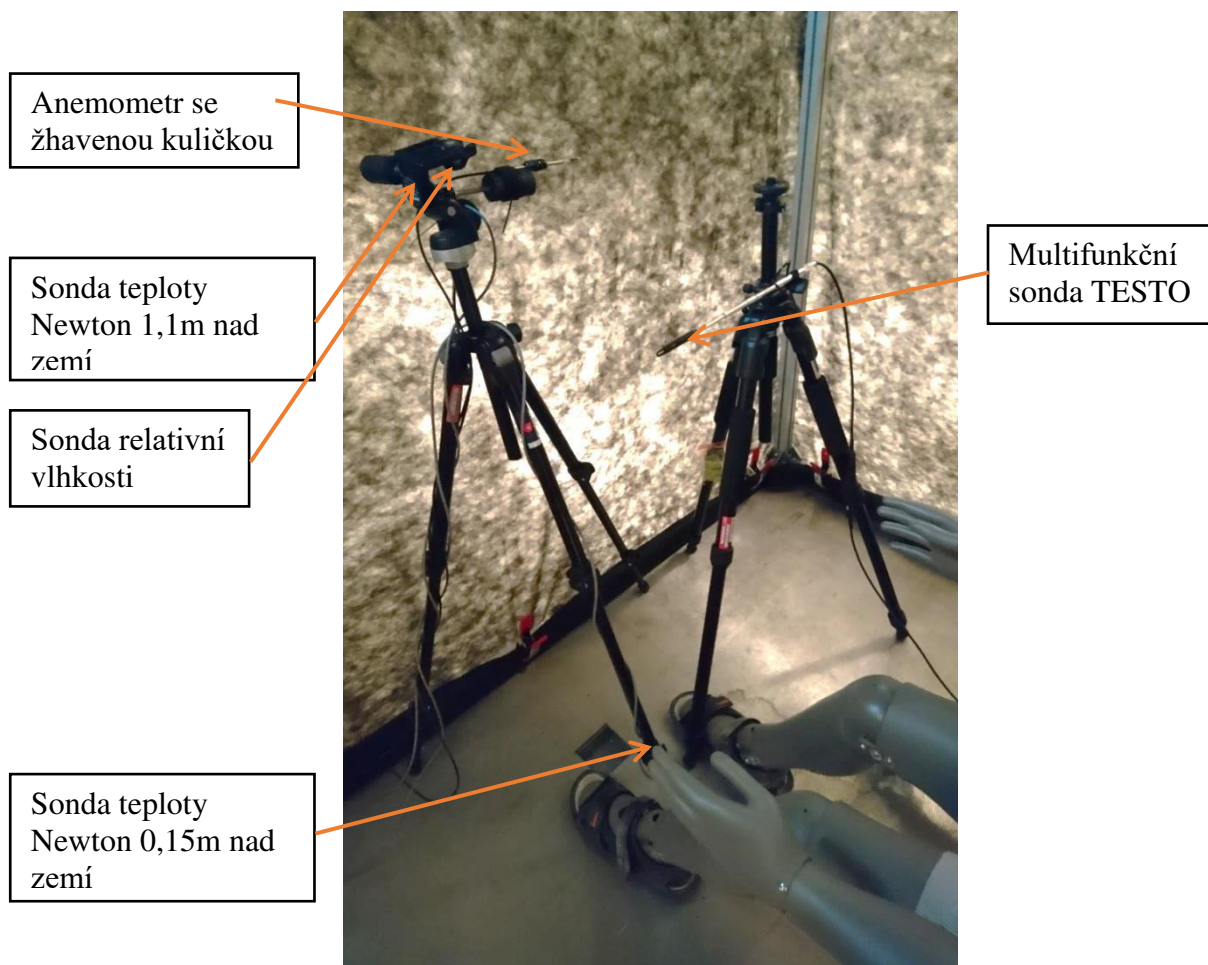


Obr. 5.6 Umístění a ukotvení tepelného manekýna

Teplotní sonda 1 je umístěna mezi chodidly manekýna ve výšce 0,15 m nad zemí, druhý snímač teploty je v úrovni hlavy manekýna, tj. ve výšce 1,1 m nad podlahou. Ve stejné výšce je naistalováno i čidlo vlhkosti vzduchu a anemometr pro měření rychlosti proudění. Kontrolní měřidlo napojené na TESTO je umístěno na druhé straně manekýna ve výšce hrudníku, cca 0,8 m nad podlahou. Rozmístění jednotlivých měřidel je na obrázku 5.7.

Tab. 5.1 Přehled použitých měřicích sond

Typ sondy	počet	přesnost	rozsah	umístění
RTD Newton	2x	$\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$	-30 až 80 $^{\circ}\text{C}$	Před manekýnem, 1,1 a 0,15 m nad podlahou
Anemometr	1x	$\pm 1\%$	0,05 až 0,5 m/s	Před manekýnem, 1,1 m nad podlahou
Sonda relativní vlhkosti	1x	$\pm 3\%$	0 až 100 %	Před manekýnem, 1,1 m nad podlahou
Tepelný tok ze segmentu	34x	$\pm 1\%$ z hodnoty	-	-
Teplota segmentu	34x	$\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$	-	-
Multifunkční sonda TESTO ϕ 12 mm	1x	$\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 2\%$ $\pm 4\%$	-20 až 70 $^{\circ}\text{C}$ 0 až 100 % 0 až 20 m/s	Před manekýnem ve výšce hrudníku



Obr. 5.7 Rozmístění měřicích sond

• Úkony před měřením

Testované sady oblečení byly ponechány při konstantní pokojové teplotě po dobu 24 hodin, aby došlo k dodržení požadavků normy ČSN 15831. Manekýn je nastaven na vyhřívání na teplotu povrchu 34 °C na všech segmentech. Je definována požadovaná teplota v klimatické komoře. Pro dodržení stejných podmínek měření je před každým měřením zhotovena fotografie, která slouží k dokumentaci jednotlivých měření a osvětlení případných odchylek v měření. Měření jsou silně závislá na poloze manekýna a na způsobu oblečení daných oděvů.

• Úkony při měření

Z dřívějších experimentů s tepelným manekýnem bylo zjištěno, že k úplné stabilizaci povrchové teploty ve všech místech figuríny dojde asi po 1 hodině. Během této doby byl sledován měřený tepelný tok, a jakmile došlo k vyrovnaní tepelných toků z párových částí manekýna, bylo spuštěno ostré měření trvající 20 minut. Stabilizace po dobu 1 hodiny se při dřívějších měřeních osvědčila jako dostatečná pro eliminaci parazitních tepelných toků do dutin manekýna, které by mohly nepříznivě ovlivňovat měření a znemožnily by opakovatelnost měření. V průběhu celého experimentu je v klimakomoře vypnuté osvětlení, které by mohlo přispívat ke zvýšení teploty vzduchu a tím nepříznivě ovlivňovat teplotní pole v okolí manekýna. Pořízené fotografie byly zhotoveny před samotným měřením nebo po něm.

6 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

V této kapitole budou uvedeny nejen měřené kombinace oděvů, ale i průběh samotného měření dle výše určené metodiky. Budou uvedeny poznatky z pretestů, které přispěly k zavedení jistých opatření, která vedla k lepšímu dodržení předepsané metodiky. V závěru kapitoly bude popsána změna počtu plánovaných měření a důvod tohoto navýšení.

6.1 Měřené kombinace oděvů

Z dostupného šatníku v aplikaci řídicího systému iHVAC a informací zjištěných o typické skladbě oblečení reálných řidičů [12] bylo sestaveno pět modelových kombinací oděvů. Do výběru oblečení byl zařazen i velmi teplý zimní oděv, který bude simulovat situaci, kdy řidič podniká krátkou jízdu autem ve velmi chladném počasí. Při všech měřeních bude mít manekýn vlasy. Modelové případy byly uspořádány do tabulky:

Tab. 6.1 Přehled měřených kombinací oděvů

část těla	léto		přechodné období	zima	
	I-sukně	II- kraťasy	III-přechodný	IV-lehký	V-těžký
hlava	vlasy	vlasy	vlasy	vlasy	vlasy
torzo	tričko	tričko	tričko+košile	tričko+mikina	tričko+ mikina+zimní bunda
ruce	bez rukavic	bez rukavic	bez rukavic	bez rukavic	rukavice
nohy	sukně	kraťasy	kalhoty	kalhoty	kalhoty
chodidla	sandále	sandále	pevné boty	pevné boty	pevné boty



Obr. 6.1 Detail trička se zadním zapínáním

Při měření kombinací s pevnými botami (kožené boty Bat'a) bude mít manekýn vždy ponožky. Manekýn má ve všech měřených případech oblečeno spodní prádlo. Jelikož je z hlavy manekýna vyvedena kabeláž a je obtížné měnit vrchní část oblečení, bylo zhotoveno tričko se zapínáním na suchý zip na zádech (obr. 6.1). Toto opatření povede ke snadnější výměně oděvu a sníží se tak nutný počet manipulací s tělem manekýna. To povede k lepšímu zajištění stejné polohy jednotlivých částí manekýna při měřeních a snížení rozptylu měření.

Tepelný odpor je závislý na materiálu ale i střihu daného oděvu, proto byla zhotovena fotodokumentace, která slouží k upřesnění použitých oděvů a k pozdějšímu vyhodnocení. Pořízené fotky mohou sloužit i k objasnění některých neočekávaných jevů, které byly pozorovány při měření. Níže jsou zobrazeny fotky oděvů, které ještě nebyly použity v předchozích měřeních s manekýnem a obdržené výsledné odpory budou sloužit k doplnění šatníku systému iHVAC. Jedná se zejména o teplou zimní bundu, která dosud nebyla proměřena, a nejsou tedy známy žádné ověřené hodnoty tepelného odporu. Pro simulaci lehkého zimního oděvu byla použita fleecová mikina. K doplnění kompletního zimního oděvu používaného při jízdě na krátkou vzdálenost byly použity prstové zimní rukavice Axon se zapínáním na suchý zip. Na obrázku

6.2 je zobrazena i použitá sukně s rozparkem na levé straně a měřené bermudy z lehkého tkaného materiálu. Je zobrazen i detail rukávu košile se zapínáním na dva knoflíky.

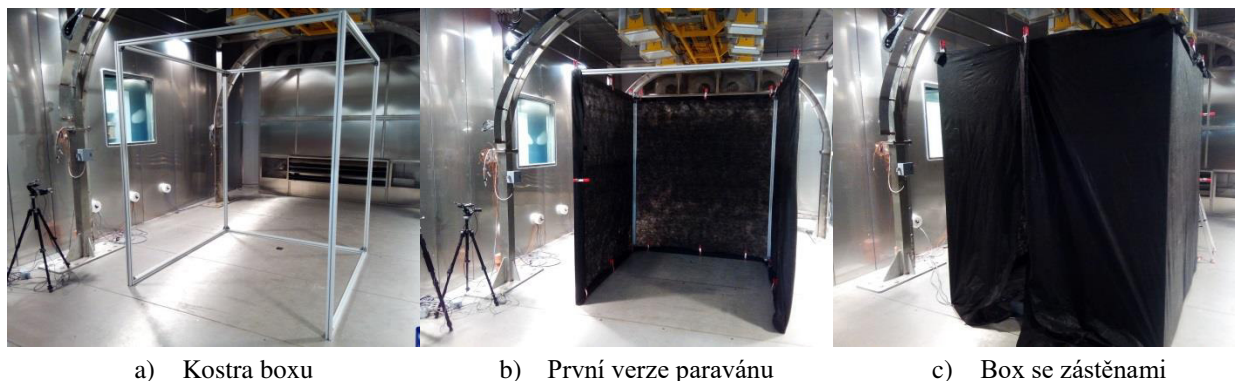


Obr. 6.2 Přehled vybraných druhů modelových oděvů

6.2 Ověření metody a pre-testy

Pro ověření navrhované metody byla zhotovena sada pre-testů, kdy se testovala vhodnost a opakovatelnost zvoleného postupu.

Při testování měření a vhodnosti podmínek měření, byl manekýn nejprve testován v otevřeném boxu (viz obr 6.3 uprostřed). Po skončení měření bylo zjištěno, že při otevřené zástěně dochází k příliš velkým fluktuacím rychlosti proudění a nebyli bychom schopni zajistit požadované klidné prostředí. K paravánu byl tedy přidělán i strop a zadní stěna (obr. 6.3 vpravo) a měření se opakovalo. V tomto případě bylo dosaženo menších fluktuací rychlosti větru a jen málo měřených hodnot bylo nad 0,1 m/s. Uzavřený kalibrační box zajišťuje homogennější teplotní pole kolem manekýna. Manekýn není ovlivněn jinými zdroji tepla, jako je například vyhřívané okno do velína.



a) Kostra boxu

b) První verze paravánu

c) Box se zástěny

Obr. 6.3 Konstrukce kalibračního boxu

Pro ověření opakovatelnosti měření byly provedeny 2 pre-testy při stejném oděvu (přechodný oděv) a stejné teplotě (24 °C) ve dvou různých dnech. Mezi měřeními uběhl jistý časový interval, během kterého byl kalibrační box rozmontován a následně opět složen do požadované polohy. Obdržené výsledky naznačovaly vhodnost zvolené metody. K potvrzení předpokladu stejných tepelných toků při různých teplotách a k ověření naměřených hodnot součinitele přestupu tepla bylo uskutečněno měření ve stejném oděvu ale jiné teplotě okolí (20 °C). Výsledky potvrdily správnost předpokladu a byla započata „ostrá“ měření.

6.3 Průběh samotného měření

Měření probíhala při stanovených teplotách v období od 13. 3. do 16. 3. na zvolených kombinacích oděvů při dodržení výše uvedené metodiky. Test 1 probíhal při teplotě 24 °C, Test 2 při teplotě 20 °C, Test 3 při teplotě 28 °C.

Komora i manekýn byly vždy zapnuty v 5:00 a dvě hodiny probíhalo nahřívání a stabilizace podmínek. Manekýn byl od spuštění komory oblečen do oděvu I – sukně. Poté bylo spuštěno 20 minutové ostré měření, jehož data byla využita ke zpracování výsledků. Následně byla změněna sada oblečení na oděv II – kraťasy a započala hodinová stabilizace v novém oděvu, než došlo k zapnutí zaznamenávání dat pro vyhodnocení. Takto byl proces opakován v průběhu celého dne. Posloupnost oděvů byla následující: Oděv I-sukně, oděv II-kraťasy, oděv III-přechodný, oděv IV-zimní lehký, oděv V-zimní těžký. Každá teplota byla měřena v jiný den a byl zachován stejný postup měření.

Při měření při teplotě 28 °C (Test 3) byly tepelné toky z manekýna při teplejších oděvech velmi nízké, silně klesaly pod limitní hodnotu 20 W/m², kterou uvádí norma ISO 15831. Kvůli tomuto poklesu a nízkému výkonu manekýna jsme přistoupili k dodatečnému měření při teplotě 16 °C (Test 4).

7 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Kapitola shrnuje naměřená data, podává informace o vyhodnocení dat a v neposlední řadě je pozornost věnována také statistickému zpracování dat. Byly určeny nejistoty měření typu A a typu B.

7.1 Metoda zpracování měřených dat

Manekýn měřil tepelný tok na 34 částech po dobu 1 hodiny, následně bylo spuštěno 20 minutové logování dat, která byla použita pro vyhodnocení celkového součinitele přestupu tepla. Pro ověření měřené teploty byla porovnána data o teplotách z tepelného manekýna a z přesného měřidla TESTO 435.

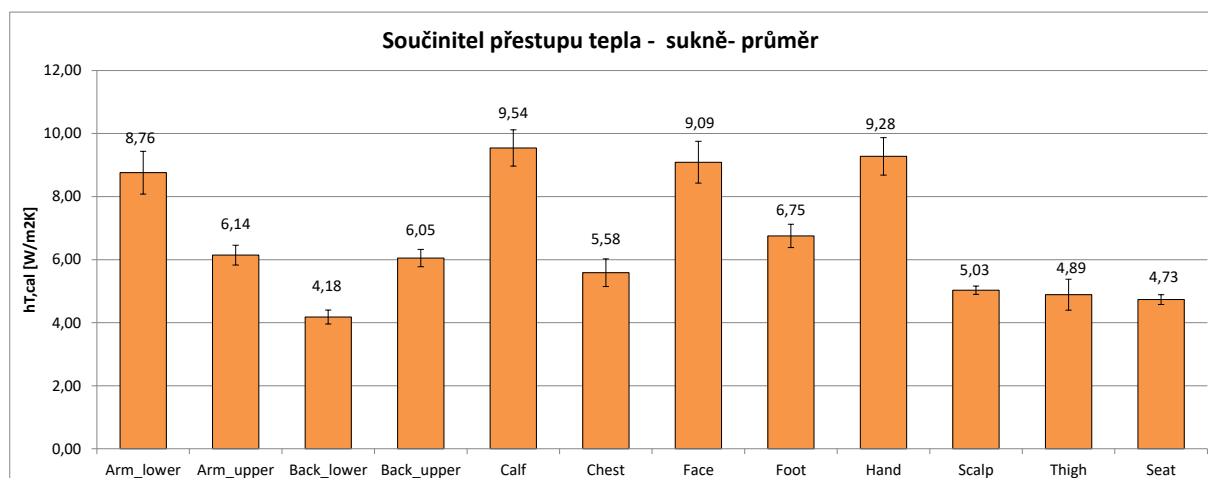
Měření bylo zaznamenáváno s periodou 10 s po dobu 20 minut, bylo tedy získáno asi 120 vzorků. Z naměřených dat byla pomocí programu Excel zjištěna průměrná hodnota tepelného toku a teplota na každém segmentu. Následně byly některé segmenty sloučeny a počet částí se tak redukoval. Tepelné toky z párových částí byly sloučeny do jedné průměrné hodnoty. Pro jednotlivé oděvy byly provedeny aritmetické průměry z měření při různých teplotách.

Na základě rovnice (5.4) byly spočteny součinitele přestupu tepla pro jednotlivé segmenty. Jejich převrácenou hodnotou obdržíme celkové tepelné odpory pro každou část. Byla spočtena ekvivalentní teplota T_{eq} dle vztahu (5.1 a 5.3). Tato data byla použita k vytvoření diagramu komfortních zón dle Nilssona. Předpokladem úspěšného měření je shoda průměrné měřené teploty okolí a vypočtené ekvivalentní teploty.

7.2 Výsledky měření

V této kapitole budou popsány výsledky jednotlivých testů. Pro názornost budou uvedeny grafy průměrů součinitelů přestupu tepla se směrodatnými odchylkami pro jednotlivé měřené kombinace oděvů. Podrobné grafy s výsledky při různých teplotách jsou obsahem přílohy. Odchytky od průměru a další odlišnosti budou dále rozvedeny v kapitole 9.

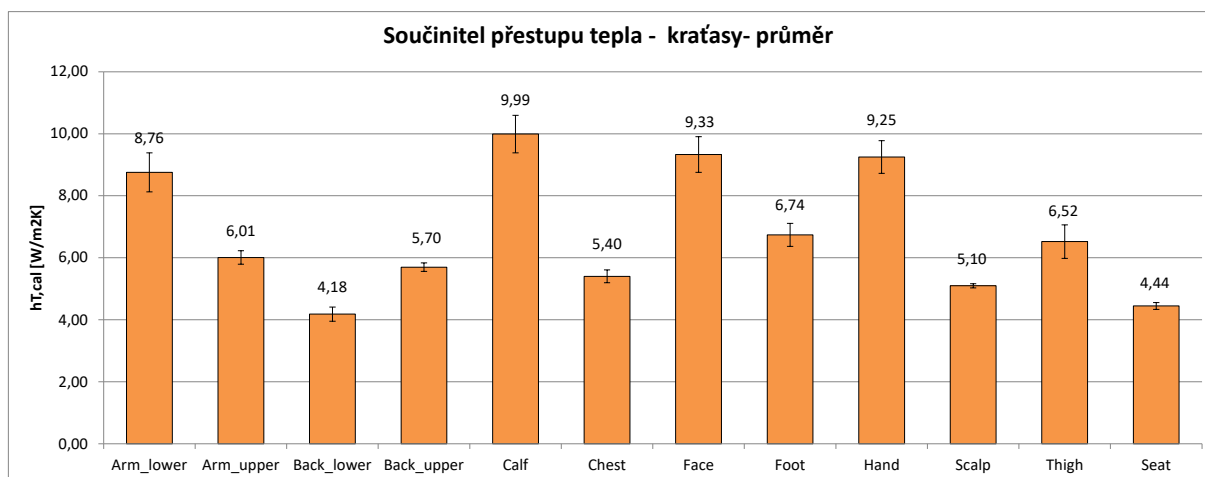
- **Oděv I – letní oděv- sukně**



Obr. 7.1 Graf součinitele přestupu tepla pro oděv I-sukně

Z výše uvedeného grafu je patrné, že největší součinitele přestupu tepla h_{cal} jsou na neodhalených částech manekýna, tj. na lýtkách (calf), předloktí (arm_lower), rukou (hand) a na obličeji (face). Nejmenší součinitel přestupu tepla pozorujeme na bedrech (back_lower), kde je na sobě více vrstev oblečení (tričko je zastrčeno v sukni + spodní prádlo) a tím je zajištěna lepší izolace. H_{cal} má na bedrech oproti h_{cal} na lýtkách méně než poloviční hodnotu.

- **Oděv II –letní oděv- kraťasy**



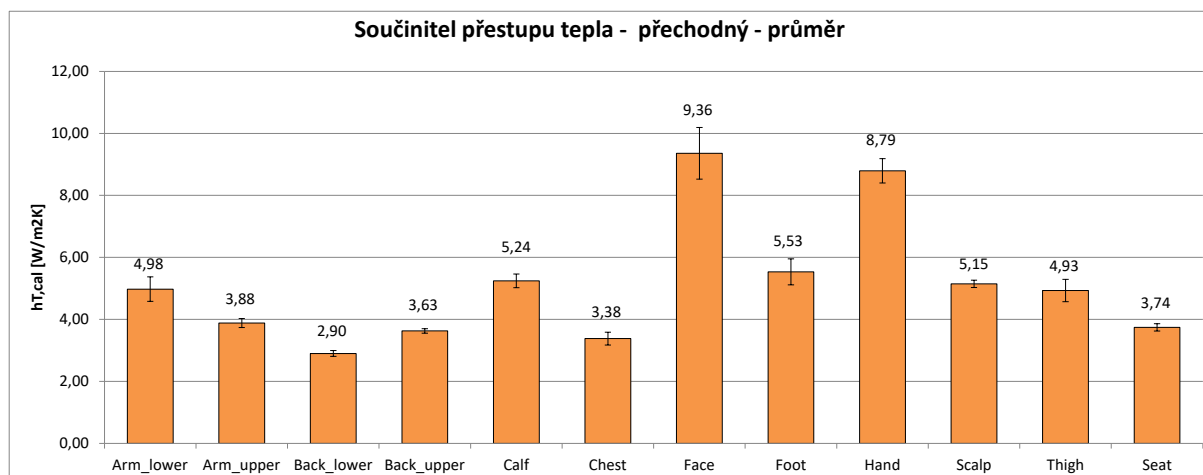
Obr. 7.2 Graf součinitele přestupu tepla pro oděv II-kraťasy

Graf součinitelů přestupu tepla h_{cal} pro typický mužský letní oděv je velmi podobný předchozímu grafu pro oděv I. Jen na lýtkách zaznamenáváme o něco vyšší h_{cal} než u sukně. Tento fakt je zapříčiněn tím, že měřené kraťasy sahaly manekýnovi do půlky stehen, zatímco zvolená sukně byla delší a částečně zakrývala i kolena a lýtka. V případě kraťasů se h_{cal} blíží 10 W/m²K. Výraznou změnu pozorujeme i na stehnech (thigh), zde je h_{cal} pro kraťasy větší. Z obrázku 7.3 je patrné, že stehna byla při měření oděvu II zakryta jen částečně. Na odhalené části stehen je intenzivnější přestup tepla, proto h_{cal} na stehnech oproti oděvu I vzrostl.



Obr. 7.3 Porovnání oděvu I-sukně a oděvu II-kraťasy

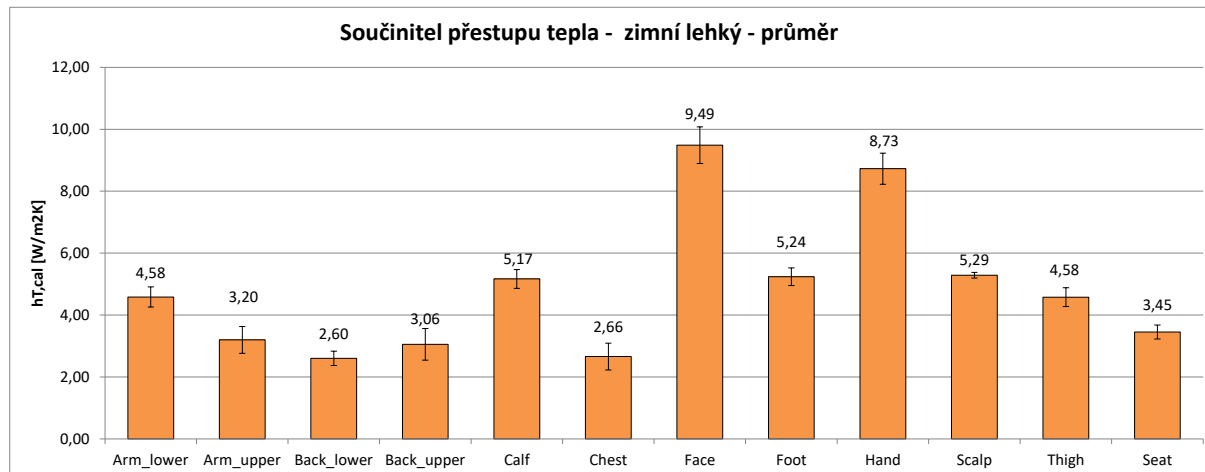
- **Oděv III – přechodný oděv**



Obr. 7.4 Graf součinitele přestupu tepla pro oděv III-přechodný

V případě přechodného oděvu jsou jedinou nezakrytou částí manekýna ruce (hand) a obličej (face), kde je h_{cal} největší. Oproti dvěma předchozím kombinacím výrazně poklesly h_{cal} na předloktí (arm_lower) a lýtkách (calf), jelikož došlo k zakrytí těchto segmentů. Na některých částech je oproti obličeji třetinový. Vliv těchto rozdílů bude popsán a lépe objasněn v diagramech komfortních zón v kapitole 8.2.

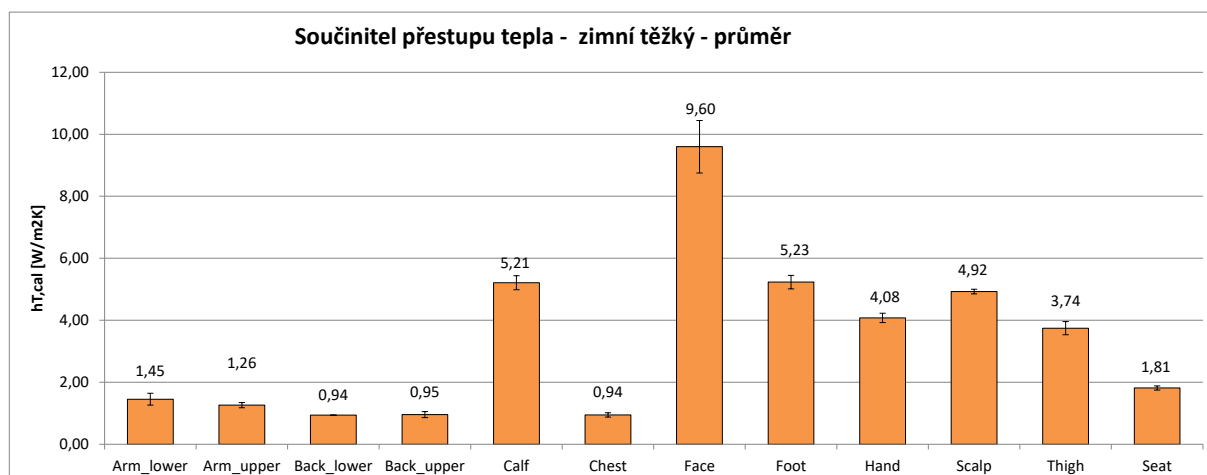
- **Oděv IV– oděv zimní- lehký**



Obr. 7.5 Graf součinitele přestupu tepla pro oděv IV-zimní lehký

Z grafu 7.5 je evidentní, že nejméně chráněnou částí zůstávají stále obličej a ruce. Naopak na ostatních částech pozorujeme pokles h_{cal} , tedy části jsou více izolovány než v případě přechodného oděvu. Tento pokles však není tak značný, jak by se dalo předpokládat, ačkoli košile byla vyměněna za fleecovou mikinu, u které byl předpoklad velké izolace. Největší zateplení je v oblasti hrudníku a beder, kde jsou h_{cal} nejnižší, klesají pod 3 W/m².K. Oproti předchozím oděvům pozorujeme mírné zvýšení h_{cal} na obličeji, tento jev bude popsán v kapitole 9.

- **Oděv V–oděv zimní- těžký**



Obr. 7.6 Graf součinitele přestupu tepla pro oděv V-zimní těžký

Nejnižší h_{cal} byly zjištěny pro oděv V. V tomto případě byla přidána jako třetí vrstva v podobě pérové zimní bundy, která působí jako dobrý izolant. Na částech tvořící trup poklesly h_{cal} na velmi nízké hodnoty kolem 1 W/m²K, při přepočtu na plochu těla manekýna zjistíme, že tepelná výměna s okolím je téměř nulová. Oproti předchozímu případu byly přidány i zateplené rukavice, které způsobí pokles h_{cal} na ruku na polovinu původní hodnoty.

7.3 Rozbor nejistot měření a opakovatelnosti

Výsledné hodnoty tepelného toku udávají pouze číselnou hodnotu měřené veličiny. Chceme-li se však zabývat přesností měření a obdržet informaci o odlišnosti naměřených dat od reálné hodnoty, je třeba věnovat pozornost nejistotám měření. Nejistota měření definuje rozptýlení hodnot měřené veličiny. Tento parametr můžeme stanovit na základě dvou dílčích nejistot. Nejistota typu A $u_A(x)$ reprezentuje statistické zpracování dat a nejistoty získané jinak než statisticky označujeme souhrnně jako nejistoty typu B $u_B(x)$ [25], [26], [27]. Zmíněné nejistoty jsou detailněji popsány níže.

- **Nejistota typu A**

Je možné říct, že nejistoty typu A vznikají systematickými chybami v opakujícím se měření a jsou zapříčiněny kolísáním naměřených dat [28]. Nejistota typu A je reprezentována statisticky předpokládaným vzorkem směrodatné odchylky od průměru $u_A(x)$. Tuto nejistotu můžeme aplikovat v případě nezávislých měření za stejných podmínek [25]. Pro výpočet nejistoty se standardně využívá vzorec (7.1).

$$u_A(x) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (7.1)$$

Kde:

$s(x)$ směrodatná odchylka aritmetického průměru

n počet měření

V případě, že se jedná o měření s počtem opakování menším než 10, je tento vztah rozšířen pomocí bezpečnostního faktoru k_{uA} , viz rovnice (7.2), závislost bezpečnostního faktoru na počtu opakování je uvedena v tabulce 7.1 [26].

Tab. 7.1 Bezpečnostní faktor [26]

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10 a více
k_{uA}	7	2,3	1,7	1,4	1,2	1,3	1,2	1,2	1

$$u_A(x) = k_{uA} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7.2)$$

Kde:

$u_A(x)$ nejistota typu A měřené veličiny x

k_{uA} bezpečnostní faktor, v našem případě $k=2,3$

n počet měření

x_i i-tá naměřená veličina

\bar{x} aritmetický průměr měřené veličiny

• Nejistota typu B

Je vyhodnocovací metoda využívající jiná než statistická zpracování. Je zapříčiněna systematickými vlivy měřicího řetězce. Je dána především přesností jednotlivých měřicích přístrojů a nelze ji snížit opakováním měření [26]. V případě nepřímých měření nezávislých veličin je nejistota funkcí nejistot jednotlivých veličin, ze kterých je spočtena žádaná veličina [27]. Pro nejistoty nepřímo měřených veličin se používá vztah:

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(x_1 \dots x_n)}{\partial x_i} u_{xi} \right)^2} \quad (7.3)$$

Kde:

u_B nejistota nepřímého měření

f funkce veličin x_1 až x_n ze kterých byla veličina počítána

x_i i-tá proměnná ve funkci f

u_{xi} nejistota i-té proměnné veličiny ve funkci f

• Nejistota typu C

Z dílčích nejistot typu A a B lze určit standartní kombinovanou nejistotu $u_C(x)$. Tuto nejistotu můžeme považovat za základní výslednou nejistotu daného měření. Výpočet se řídí pomocí rovnice (7.4). Platí pro normální rozdělení naměřených hodnot [25].

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (7.4)$$

Standartní kombinovaná nejistota určuje interval, ve kterém se s pravděpodobností 68% nachází přesná hodnota měřené veličiny. Tento interval lze podle potřeby rozšířit koeficientem rozšíření k_r na 95% nebo 99% interval spolehlivosti. Tuto nejistotu pak nazýváme rozšířenou nejistotou [26]. Pro účely vyhodnocení předpokládáme normální Gaussovo rozdělení naměřených dat. Cílem této práce bude určit 95% interval spolehlivosti, pracujeme tedy s $k_r = 2$. Potom rozšířená nejistota U bude určena vztahem:

$$U(x) = k_r \cdot u_c(x) \quad (7.5)$$

- Systematické chyby**

Jsou způsobeny zvolenou metodou měření, chybou měřicích přístrojů nebo nedostatečnou znalostí obsluhy těchto zařízení. Je snaha systematické chyby minimalizovat. Systematické chyby je možno odhalit porovnáním naměřených hodnot s výsledky měření jinou metodou [25], [28].

Během měření byla vnášena systematická chyba při měření oděvů, kdy bylo s manekýnem hýbáno, přestože byla dělána fotodokumentace k dodržení stejné polohy, lze předpokládat, že poloha končetin a výška rukou nad zemí se během celého měření mírně měnila. Tato manipulace však nezpůsobila žádné hrubé chyby v měření.

- Příklad výpočtu nejistot**

Výpočet nejistot a ověření opakovatelnosti měření bude demonstrováno na měřeních přechodného oděvu při 24 °C, jedná se tedy o Pretest 2 a 5 a ostré měření označené jako Test 2. Měření probíhala nezávisle na sobě ve třech různých dnech. Mezi Pretestem 2 a 5 byl demontován kalibrační box a následně pro účely měření opět složen. Z naměřených hodnot byly určeny průměry pro jednotlivé testy a následně pro celý soubor měření, viz tabulka 7.2.

Tab. 7.2 Součinitele přestupu tepla pro opakované měření při 24 °C

Manikin segment/B.c.	Pretest 2	Pretest 5	Test 1	průměr
	hcal	hcal	hcal	hcal průměr
	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
Arm_lower	4,90	4,91	4,98	4,93
Arm_upper	3,74	3,87	3,98	3,86
Back_lower	2,99	2,92	2,83	2,91
Back_upper	3,80	3,91	3,60	3,77
Calf	5,05	5,01	5,20	5,09
Chest	3,26	3,38	3,54	3,39
Face	9,45	9,06	9,37	9,30
Foot	5,20	5,22	5,42	5,28
Hand	9,08	8,97	8,75	8,94
Scalp	5,34	5,15	5,16	5,22
Thigh	4,70	4,80	4,89	4,80
Seat	3,82	3,88	3,77	3,82

Pro výpočet nejistoty typu A je nezbytné znát směrodatnou odchylku, počet měření a bezpečnostní koeficient. Směrodatná odchylka byla spočtena pomocí funkce SMODCH.VYBER.S v programu Excel a následně byla tato hodnota podělena odmocninou z počtu měření dle vztahu (7.1). Pro názornou ukázkou výpočtu bude proveden demonstrativní výpočet pro jednu část manekýna a to pro hrudník. Počet měření $n = 3$, tedy dle tabulky 7.1 je bezpečnostní faktor $k_{uA} = 2,3$. Hodnota směrodatné odchylky pro hrudník činí $s = 0,14$. Potom:

$$u_A = k_{uA} \frac{s}{\sqrt{n}} = 2,3 \frac{0,14}{\sqrt{3}} = 0,19 \quad W/m^2K \quad (7.6)$$

Nejistotu typu B určíme z dostupných dílčích nejistot jednotlivých měřených veličin, na nichž je závislý výpočet součinitele přestupu tepla. Z rovnice (5.4) je patrné, že h_{cal} je funkcí třech proměnných a to tepelného toku \dot{q}_0 , teploty povrchu T_p a teploty okolního vzduchu T_a . Pro výpočet nejistoty typu B je tedy nutné parciálně derivovat podle všech proměnných. Potom lze rovnici (7.3) psát ve tvaru:

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{\partial h_{cal}}{\partial \dot{q}_0} u_{\dot{q}_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_{cal}}{\partial T_p} u_{T_p}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_{cal}}{\partial T_a} u_{T_a}\right)^2} \quad (7.7)$$

Po dosazení rovnice (5.4) do vztahu (7.7) a parciální derivaci dostaneme výsledný vztah pro výpočet nejistoty typu B:

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{1}{T_p - T_a} u_{\dot{q}_0}\right)^2 + \left(-\frac{q_0}{(T_p - T_a)^2} u_{T_p}\right)^2 + \left(\frac{q_0}{(T_p - T_a)^2} u_{T_a}\right)^2} \quad (7.8)$$

Nejistoty měřených veličin pomocí použitého měřicího zařízení jsou uvedeny v tabulce 5.1, jedná se však o 95% interval pravděpodobnosti. Pro účel výpočtu intervalu spolehlivosti 68% je tedy nutné hodnoty uvedené v tabulce 5.1 vydělit koeficientem rozšíření $k_r = 2$. Potom tedy u_{T_p} a u_{T_a} je rovno $\pm 0,05$ a u_{q_0} určíme jako 0,05% z naměřené hodnoty pro stejný konfidenční interval.

Tab. 7.3 Naměřené veličiny pro opakované měření při 24 °C

Manikin segment/B.c	Pretest 2			Pretest 5			Test 1			průměr		
	q_0	T_p	T_a	q_0	T_p	T_a	q_0	T_p	T_a	q_0	T_p	T_a
	[W/m ²]	[°C]	[°C]	[W/m ²]	[°C]	[°C]	[W/m ²]	[°C]	[°C]	[W/m ²]	[°C]	[°C]
Arm_lower	48,69	34	24,07	46,63	34	24,5	48,64	34	24,24	47,99	34	24,27
Arm_upper	37,18	34		36,76	34		38,82	34		37,59	34	
Back_lower	29,72	34		27,70	34		27,61	34		28,34	34	
Back_upper	37,76	34		37,16	34		35,17	34		36,70	34	
Calf	50,14	34		47,62	34		50,74	34		49,50	34	
Chest	32,32	34		32,07	34		34,55	34		32,98	34	
Face	93,86	34		86,07	34		91,42	34		90,45	34	
Foot	51,64	34		49,56	34		52,86	34		51,35	34	
Hand	90,15	34		85,20	34		85,42	34		86,92	34	
Scalp	52,98	34		48,95	34		50,36	34		50,76	34	
Thigh	46,66	34		45,59	34		47,71	34		46,65	34	
Seat	37,90	34		36,86	34		36,77	34		37,18	34	

Pro určení nejistoty typu B byly spočteny průměry z jednotlivých měřených veličin pro každý test a následně i pro celou sadu měření. Naměřené veličiny a průměry jsou uvedeny v tabulce 7.3. Průměrná hodnota veličiny se tedy dosazuje do vzorce (7.8), ukázkový výpočet je proveden pro stejnou část jako nejistota typu A, tedy pro hrudník. Potom $u_{q_0} = 0,05 \cdot 32,98 = 1,65 \text{ W/m}^2$.

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{1}{34 - 24,27} 1,65\right)^2 + \left(-\frac{32,98}{(34 - 24,27)^2} 0,05\right)^2 + \left(\frac{32,98}{(34 - 24,27)^2} 0,05\right)^2} \quad (7.9)$$

$$= 0,17 \quad W/m^2K$$

Výsledná kombinovaná nejistota typu C pro hrudník je potom:

$$u_C = \sqrt{0,19^2 + 0,17^2} = 0,25 \quad W/m^2K \quad (7.10)$$

Tuto nejistotu dále rozšíříme na interval 95% spolehlivosti pomocí koeficientu rozšíření k_r dle rovnice (7.5). Předpokládáme-li normální rozdělení je k_r rovno 2.

$$U = 2 \cdot 0,25 = 0,5 \quad W/m^2K \quad (7.11)$$

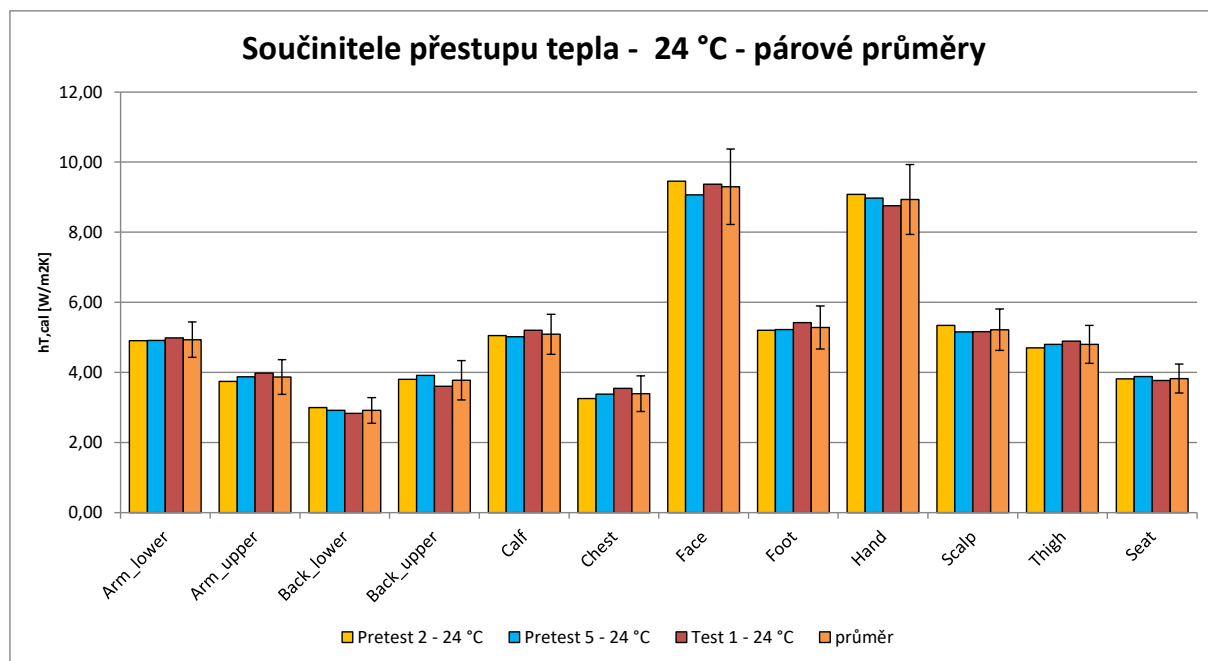
Konečná hodnota součinitele přestupu tepla pro hrudník manekýna se zahrnutím nejistot měření je tedy $3,39 \pm 0,5 \text{ W/m}^2\text{.K}$. V tabulce 7.4 jsou uvedeny nejistoty pro všechny segmenty manekýna.

Tab. 7.4 Nejistoty měření pro opakované měření při 24 °C

Manikin segment/B.c.	směr. odchylka	nejistota typu A	nejistota typu B	výsledná nejistota	rozšířená nejistota
	$s(x)$ [W/m ² .K]	$u_A(x)$ [W/m ² .K]	$u_B(x)$ [W/m ² .K]	$u_C(x)$ [W/m ² .K]	$U_C(x)$ [W/m ² .K]
Arm_lower	0,04	0,06	0,25	0,25	0,51
Arm_upper	0,12	0,15	0,19	0,25	0,50
Back_lower	0,08	0,11	0,15	0,18	0,36
Back_upper	0,16	0,21	0,19	0,28	0,56
Calf	0,10	0,13	0,25	0,29	0,57
Chest	0,14	0,19	0,17	0,25	0,51
Face	0,21	0,27	0,46	0,54	1,08
Foot	0,12	0,16	0,26	0,31	0,62
Hand	0,17	0,22	0,45	0,50	1,00
Scalp	0,10	0,14	0,26	0,29	0,59
Thigh	0,09	0,13	0,24	0,27	0,54
Seat	0,06	0,08	0,19	0,21	0,41

• Opakovatelnost měření

Jak již bylo zmíněno výše, měření při teplotě 24 °C bylo provedeno ve třech nezávislých dnech, mezi měřeními Pretest 2 a Pretest 5 byl dokonce rozebrán kalibrační box a znovu složen. Tato měření jsou proto vhodná na vyhodnocení opakovatelnosti měřicího procesu. Z grafu 7.7 je zřejmé, že při dodržení zvolené metodiky jsou vypočtené součinitele přestupu tepla pro všechna měření a pro všechny části manekýna velmi podobné. V grafu je vykreslena i průměrná hodnota součinitele přestupu tepla i s nejistotou měření. Všechny dílčí součinitele přestupu tepla leží v intervalu spolehlivosti průměru, je tedy možné tvrdit, že zvolená metodika se vyznačuje dobrou opakovatelností měření a přináší uspokojivé výsledky.



Obr. 7.7 Součinitele přestupu tepla - 24 °C- Oděv III-přechodný oděv

Závěrem lze konstatovat fakt, že byla zajištěna dobrá opakovatelnost, přestože byl kalibrační box rozebrán s celým měřicím vybavením vyvezen z komory a následně znovu složen. Manipulací s boxem a měřicím vybavením je do měření vnášena jistá nejistota, jelikož nejsme schopni box pokaždé sestavit přesně stejně. Vždy zaznamenáme mírné odlišnosti ve vypnutí plachty, umístění manekýna i jednotlivých senzorů v boxu. Z výsledků měření je však patrné, že tyto odchylky nemají na výsledky měření prakticky žádný podstatný vliv.

8 DATA PRO ŠATNÍK IHVAC

Tato kapitola se zabývá porovnáním tepelných odporů vypočtených z měřených dat se stávajícím šatníkem pro systém iHVAC. Dále budou vykresleny diagramy komfortních zón pro jednotlivé oděvy a provedeno zhodnocení jednotlivých diagramů.

8.1 Porovnání se stávajícím šatníkem iHVAC

Jelikož je tabulka, se kterou pracuje systém iHVAC rozsáhlá, bude její původní i upřesněná verze uvedena v příloze. Níže budou popsány dílčí tabulky pro jednotlivé sekce těla a to pro hlavu, torzo, ruce, nohy a chodidla, které jsou pro účely srovnání dostačující a celkově přehlednější.

Pro účely porovnání byly součinitele přestupu tepla převedeny na tepelné odpory pomocí rovnice (5.2). Jelikož jsme získali celkový tepelný odpor R_T , avšak aplikace iHVAC vyžaduje hodnoty R_{cl} a R_a (upřesnění interpretace viz níže), je pro obdržení odporu oděvu R_{cl} nutné hodnotu R_a od R_T odečíst, viz rovnice (3.14). Z důvodů softwarové implementace diagramu komfortních zón v aplikaci iHVAC je jako referenční hodnota R_a použita hodnota 0,065 m².K/W, která odpovídá kalibrační konstantě vyvinutých senzorů ekvivalentní teploty. Tento postup přepočtu naměřených hodnot R_T na R_{cl} tedy umožňuje porovnání původních a nově vyhodnocených tepelných odporů měřených oděvů. Nutno však podotknout, že takto vypočtené hodnoty R_{cl} nejsou přesnými hodnotami tepelného odporu změřených oděvů (R_a by se totiž muselo určit měřením na neoblečeném manekýnovi), ale upravenými hodnotami R_T vhodnými pro výpočet diagramu komfortních zón a ekvivalentní teploty v aplikaci iHVAC.

Jako první jsou uvedeny výsledky pro oblast hlavy. V tomto experimentu jsme se zabývali pouze pokrytím hlavy vlasy (hair), zatímco samotná aplikace pracuje i s verzí bez vlasů, s kšiltovkou a se zimní čepicí. V levém sloupci tabulky (tab. 8.1) jsou uvedeny původní hodnoty a pravý ukazuje vypočtené hodnoty R_{cl} z měření. Nově získané hodnoty R_{cl} jsou od původních odlišné až na třetím desetinném místě. Uvědomíme-li si jaká je velikost plochy hlavy, potom je tato odchylka naprosto zanedbatelná.

Tab. 8.1 Tepelný odpor - hlava

skupina	segment	R _{cl} [m ² K/W]	
		Hair	
		původní	nový
HEAD	Scalp (hair)	0,137	0,131
	Face	0,044	0,042

Nejrozsáhlejší změny byly provedeny v oblasti horní poloviny těla, čili torza. Tabulka 8.2 podává důkladné informace o změnách R_{cl} pro jednotlivé oděvy. V případě trička jsou původní hodnoty R_{cl} oproti naměřeným vyšší. Největší rozdíl je patrný na horních částech paží, kde je rozdíl větší jak 0,04 m².K/W. Pro účely měření bylo vyrobeno tričko se zapínáním na suchý zip (viz kapitola 6.1), zatímco v předchozích měřeních bylo použito tričko jiné. Tento fakt vysvětluje jiné naměřené hodnoty R_{cl} , neboť tepelný odpor závisí i na materiálu a střihu. Právě odlišná délka rukávů vysvětluje rozdíl R_{cl} v oblasti ramen. Pro košili a mikinu zaznamenáváme pouze drobné odchylky tepelných odporů. Jistý rozpor nastává v oblasti předloktí, kde se jeví původní oděvy jako lépe izolující. Vliv na tuto skutečnost má zajisté

použitá délka rukávů pro podvrstvu. V případě našeho měření šlo o tričko s krátkým rukávem, tudíž v oblasti předloktí není kromě mikiny či košile žádná jiná izolační vrstva. V případě předešlých měření na OTTP bylo také využíváno trička s krátkým rukávem, tudíž rozpor může pramenit z jiné použité svrchní izolační vrstvy. Vliv na velikost R_{cl} předloktí bude mít i výška paží nad stehny, které svým tepelným výkonem ovlivňují vzduch ve svém nejbližším okolí. Největší přínos pro aplikaci má proměření teplé zimní bundy, jejíž data nebyla dosud k dispozici. Z tabulky 8.2 je patrné, že největší izolaci poskytuje bunda v oblasti trupu a beder, kde hodnota R_{cl} dokonce překračuje $1 \text{ m}^2\text{K/W}$. Přidáním bundy na lehký zimní oděv (tričko + mikina) zvýšíme tepelný odpor na trojnásobek původní hodnoty. Tato zjištění jsou velmi podstatná pro další nastavení aplikace iHVAC, neboť dosud nepracovala s možností takto vysokých tepelných odporů.

Tab. 8.2 Tepelný odpor - tělo

skupina	segment	$R_{cl} [\text{m}^2\text{K/W}]$							
		Tshirt		Shirt		Sweatshirt		Winter jacket	
		původní	nový	původní	nový	původní	nový	původní	nový
TORSO	Chest	0,150	0,118	0,240	0,232	0,299	0,318	x	0,999
	Back upper	0,120	0,104	0,214	0,211	0,261	0,268	x	0,991
	Back lower	0,231	0,240	0,318	0,280	0,342	0,322	x	1,002
	L up arm	0,144	0,098	0,222	0,199	0,245	0,251	x	0,757
	R up arm	0,144	0,101	0,222	0,187	0,244	0,253	x	0,709
	L lo arm	0,059	0,048	0,168	0,137	0,189	0,152	x	0,610
	R lo arm	0,059	0,051	0,168	0,137	0,189	0,156	x	0,662

Níže uvedená tabulka 8.3 pro oblast dlaní slouží pro porovnání situace, kdy má člověk oblečen rukavice a kdy nikoli. Pro případ bez rukavic se naměřené hodnoty téměř shodují s původními předpoklady. Pro případ rukavic však zaznamenáváme navýšení tepelného odporu. Při měření byly použity zimní rukavice (viz kapitola 6.1), proto jsou hodnoty tepelného odporu větší než současné hodnoty, které pracují s předpokladem podvlekových tenkých rukavic. Aplikace iHVAC tedy může pracovat s dvojím typem rukavic, s lehkými bavlněnými a se zateplenými. Zajímavé je také pozorovat odlišnost mezi vypočtenými tepelnými odpory pro levou a pravou ruku. Tento rozdíl můžeme označit za systematickou chybu měření, kterou nejsme schopni eliminovat.

Tab. 8.3 Tepelný odpor - ruce

skupina	segment	$R_{cl} [\text{m}^2\text{K/W}]$			
		No gloves		Gloves	
		původní	nový	původní	nový
HANDS	L hand	0,051	0,045	0,143	0,176
	R hand	0,051	0,048	0,143	0,185

Další oblastí, kde byly upřesněny hodnoty tepelných odporů, jsou nohy. Zkoumán byl především rozdíl mezi sukní a kraťasy, dále pak byly proměřeny hodnoty tepelných odporů R_{cl} pro kalhoty. Zaměříme-li se na rozdíl mezi sukní a kraťasy, zjistíme, že sukně poskytuje lepší izolaci v oblasti stehů a lýtek. Tato skutečnost je však zapříčiněna delší délkou sukně oproti kraťasům, viz kapitola 7.2 obr. 7.3. Nově zjištěné R_{cl} jsou oproti stávajícím nižší. Ovšem doposud pracovala aplikace iHVAC s teoretickými hodnotami odporů, proměřením

jednotlivých typů oděvů tedy dostáváme zpřesnění odhadnutých hodnot. Pro kalhoty nezaznamenáváme žádné větší odlišnosti až na oblast hýždí (seat), kde je téměř dvojnásobné. Tento fakt může být zapříčiněn ovlivněním jiných oděvů, neboť tričko bylo zastrčeno v kalhotách a další svrchní oděvy překrývaly oblast sedu.

Tab. 8.4 Tepelný odpor- nohy

skupina	segment	R _{cl} [m ² K/W]					
		Shorts		Skirt		Trousers	
		původní	nový	původní	nový	původní	nový
LEGS	L thigh	0,157	0,101	0,157	0,126	0,156	0,160
	R thigh	0,157	0,114	0,157	0,159	0,156	0,171
	L calf	0,065	0,034	0,065	0,037	0,144	0,125
	R calf	0,065	0,039	0,065	0,043	0,144	0,130
	seat	0,187	0,158	0,187	0,146	0,180	0,305

Poslední částí těla, kde došlo k upřesnění tabulkových hodnot, jsou chodidla (tab. 8.5). Proměřeny byly sandály a pevné boty. Tato práce se nezabývala měřením vysokých zateplených bot. Pro sandály R_{cl} oproti tabulkovým o 0,04 m²/W. Pro případ pevné obuvi můžeme hovořit o shodě se stávající hodnotou R_{cl} .

Tab. 8.5 Tepelný odpor - chodidla

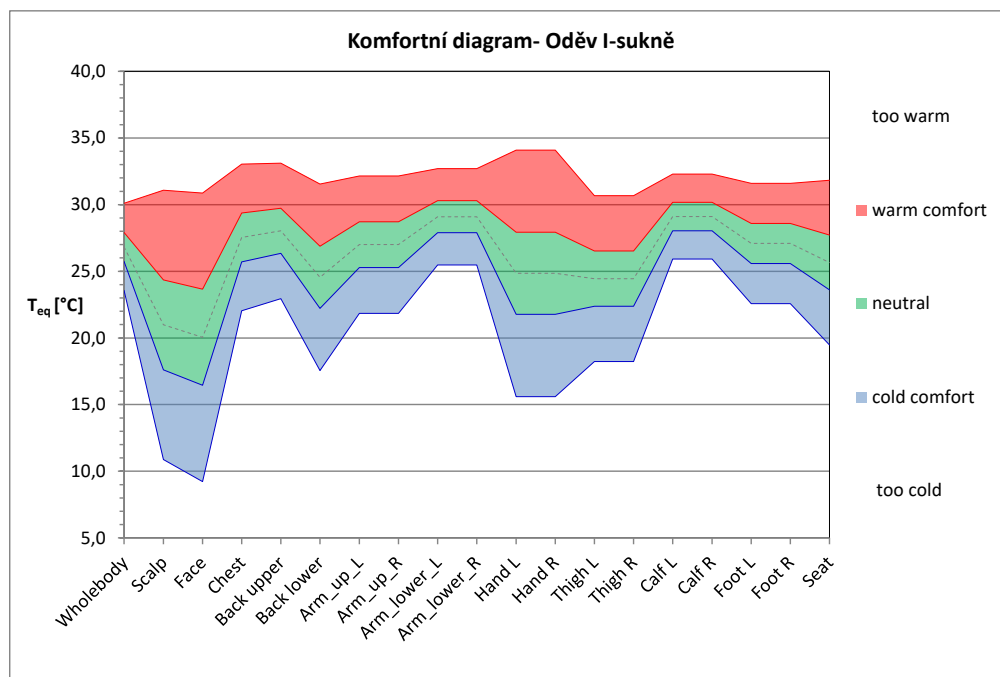
skupina	segment	R _{cl} [m ² K/W]			
		Sandal		Shoes	
		původní	nový	původní	nový
FEET	L foot	0,122	0,081	0,124	0,124
	R foot	0,122	0,086	0,124	0,123

8.2 Diagramy komfortních zón

Na základě vypočtených průměrných hodnot součinitele přestupu tepla pro jednotlivé oděvy byly pomocí programu Excel vytvořeny diagramy komfortních zón dle principů pana Nilssona[10], které jsou uvedeny v kapitole 5.2. Výsledný graf byl tvořen pomocí rovnice (5.3). Tento způsob tvorby grafu je platný pro oděvy s R_{cl} 0 až 1. V případě zimního těžkého oděvu se tedy pohybujeme na hranici tohoto intervalu. Z mnohých studií a pozorování však bylo zjištěno, že tento typ oděvu je typický pro cestování na krátké vzdálenosti a proto byl do měření zahrnut.

• Oděv I – letní oděv- sukně

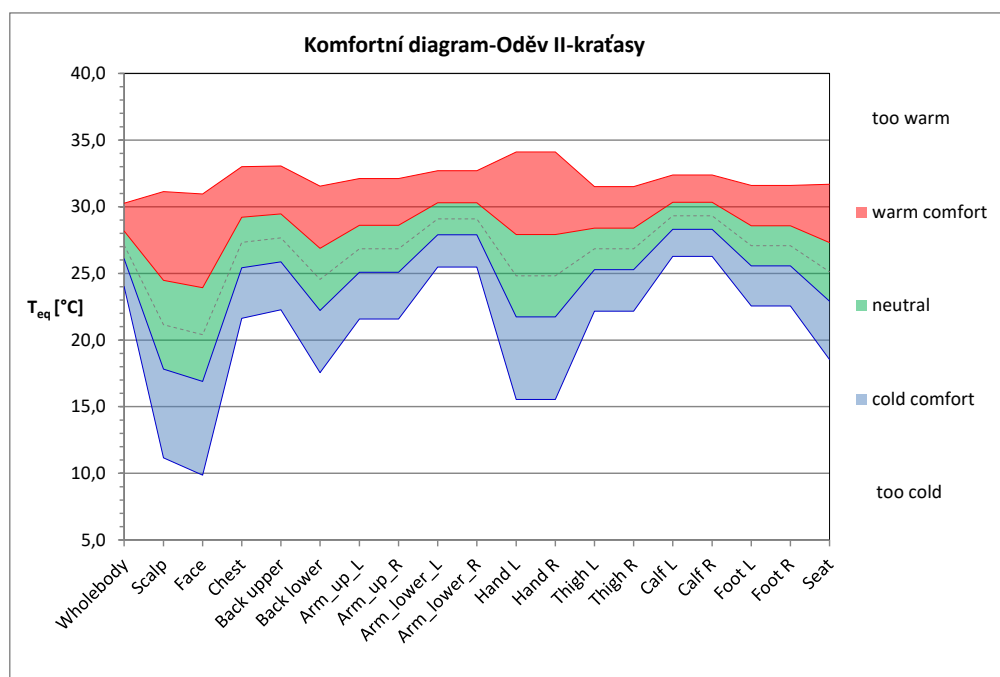
Z diagramu je patrné, že pro letní oděv je interval teploty komfortu poměrně úzký, avšak poměrně rovnoměrný pro všechny části těla. Intenzivnější chlazení bude vhodné zejména v oblasti obličeje a dlaní. Účelné bude také chlazení sedadla neboť i na bedrech a v oblasti, která se dotýká sedačky, zaznamenáváme nižší komfortní teplotu. Dále lze konstatovat, že i při teplotě 30 °C bude na všech částech dosaženo tepelné pohody. Pohybujeme se ovšem v mezí oblasti komfortu označovanou jako „teplo, ale příjemně“.



Obr. 8.1 Diagram komfortních zón- oděv I-sukně

- Oděv II – letní oděv – kratásky**

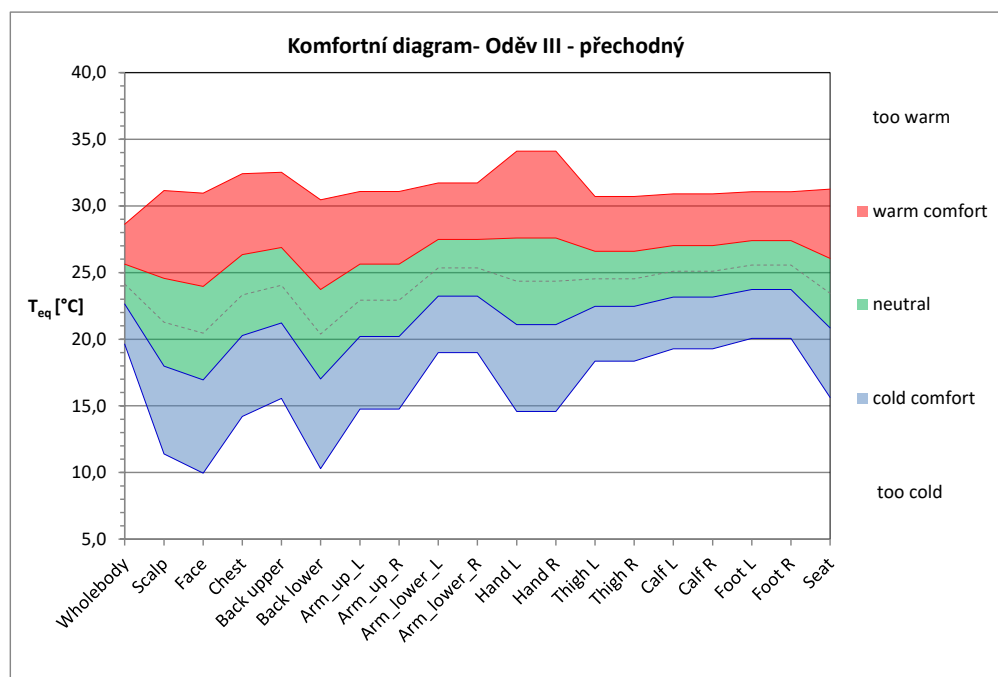
Na níže uvedeném grafu je dobře viditelné, že co se týče komfortu, není prakticky rozdíl mezi sukni a kratásky. Oproti sukni poskytují měřené kratásky menší izolaci na lýtkách, tento fakt však závisí na délce zvoleného oděvu a byl již popsán v předchozích kapitolách, viz 7.2 a 8.1. Je tedy možné tvrdit, že aplikace iHVAC může pro oba oděvy pracovat se stejnými vstupními hodnotami.



Obr. 8.2 Diagram komfortních zón- oděv II-kratásky

- **Oděv III – přechodný**

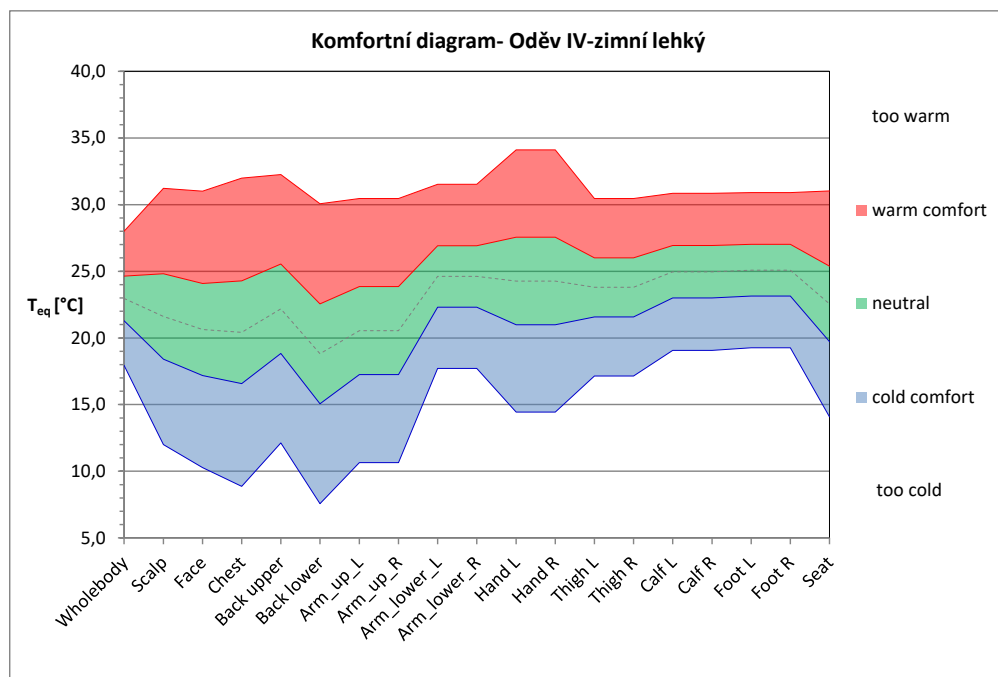
Pro přechodný oděv je příznačné rozšíření jednotlivých komfortních intervalů. Graf poukazuje na skutečnost, že přechodný oděv má nejrovnoměrnější průběh na jednotlivých segmentech těla. Nezaznamenáváme oproti ostatním oděvům žádné větší výkyvy na žádné části, proto regulace systému iHVAC bude nejjednodušší. Jako neutrální teplotu můžeme označit hodnotu 24 °C (viz graf). Tento fakt doplňuje poznatky získané z tabulkových hodnot měření a dokládá tvrzení, že teplota 25 °C je vhodná pro měření tepelného komfortu.



Obr. 8.3 Diagram komfortních zón - oděv III-přechodný

- **Oděv IV – zimní lehký**

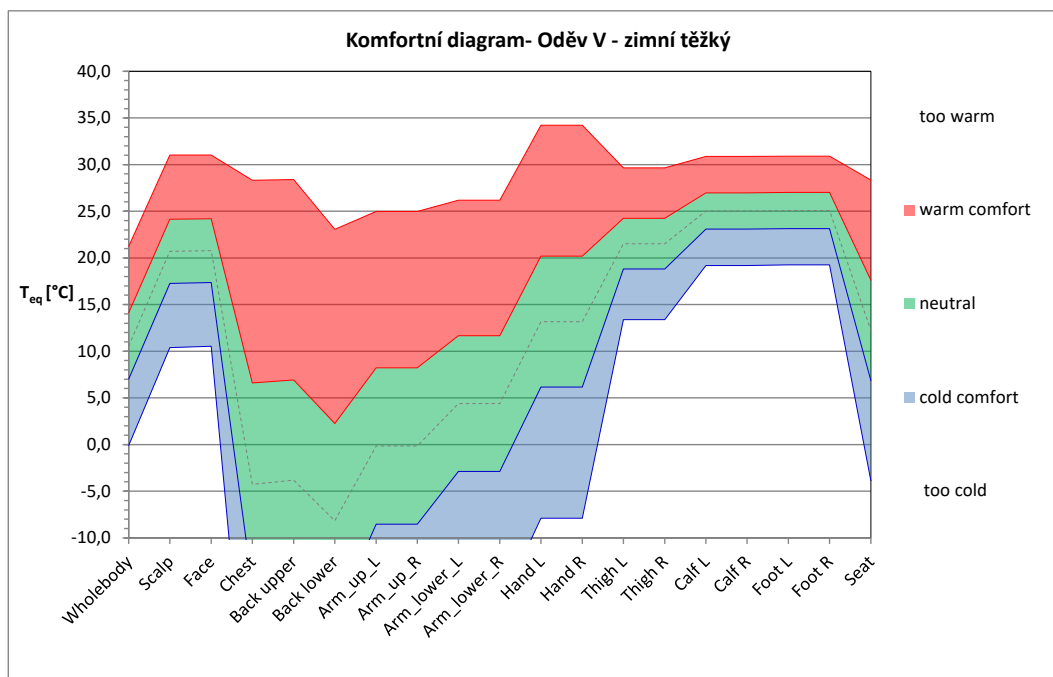
Rozložení komfortních intervalů pro lehký zimní oděv je patrné z níže uvedeného diagramu. Ve srovnání s diagramem pro přechodný oděv se neutrální zóna pro horní část těla posunula k nižším teplotám. Tento posun je zapříčiněn větší izolační vrstvou na horní polovině těla. Zajímavé však je, že rozdíl mezi dolními mezními teplotami neutrální zóny pro přechodný a lehký zimní oděv není tak velký, jak by se dalo při záměně košile za mikinu očekávat. Největší efekt mikiny spočívá v zateplení torza a k rozšíření pásma chladno, ale příjemně v oblasti beder (lower back). Při MTV -1,5 se posune teplota z 10 °C pro košili na 7 °C pro mikinu. Můžeme však konstatovat, že použitá fleecová mikina má v daném kalibračním boxu pro určité části těla v zásadě podobné izolační vlastnosti jako bavlněná košile. Na ostatních částech těla zůstal oděv nezměněn, proto se zóny komfortu shodují s předchozím diagramem.



Obr. 8.4 Diagram komfortních zón- oděv IV-zimní lehký

• Oděv V – zimní těžký

Jelikož se pohybujeme na horní hranici intervalu odporů, pro které je konstrukce diagramu vytvořena, je třeba brát výsledky pouze jako informativní, sloužící k vizuální představě o komfortních zónách v teplém zimním oděvu. Je patrné, že při použití tohoto typu oděvu ve vozidle je pro dosažení tepelného komfortu na různých částech těla nutná velmi rozdílná ekvivalentní teplota. Například trup a ruce jsou velmi dobře izolovány a odpovídající ekvivalentní teplota se pohybuje v rozmezí -5 až +10 °C. Ačkoliv se to nezdá reálné, takového rozsahu ekvivalentních teplot lze v zimních podmínkách v špatně izolované kabině vozu bez problémů dosáhnout. Nutné je mít na paměti totiž fakt, že ekvivalentní teplota je výsledkem působení radiace a konvekce a lež tedy kombinací teploty vzduchu a rychlosti proudění dosahovat v kabině jejích velkých lokálních změn. Výsledky měření a diagram také potvrzují známý fakt, že tento oděv je vhodný pouze na krátké cestovní vzdálenosti, kdy se projevují přechodové jevy při vytápění kabiny (např. náběh topení) a po dosažení jistého vyhřátí interiéru dochází zpravidla k změně oděvu většinou na typ IV či III. Dobře lze také odvodit, že pokud by pro ohřev částí těla jako hlava a nohy bylo využito radiální či kontaktní vytápění (vyhřívání sedadlo), může být teplota vzduchu v kabině udržována na relativně nízké hodnotě = potenciál pro úspory při vytápění.



Obr. 8.5 Diagram komfortních zón- oděv V-zimní těžký

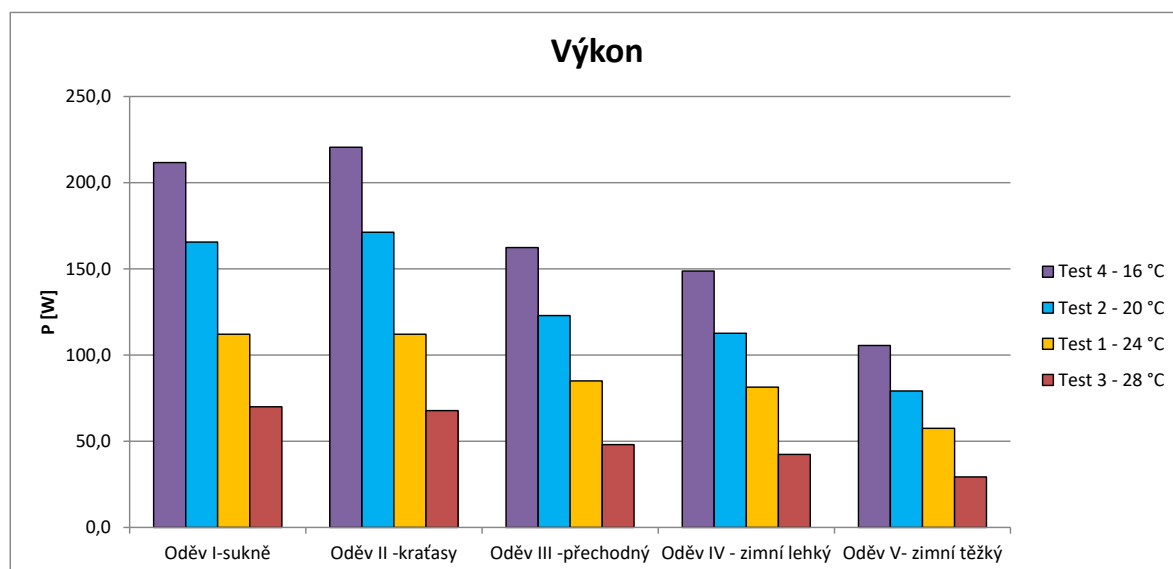
9 DISKUZE

Při měření při teplotě 28 °C byly tepelné toky na některých částech menší než 20 W/m², což je hraniční hodnota, kterou doporučuje norma. Proto bylo přistoupeno k dodatečnému měření při 16 °C. Po zpracování výsledků se však ukázalo, že přesnost měření byla zachována i při tepelných tocích nižších než 20 W/m² a nebylo tedy nutné zavádět další měření. Toto měření však přispělo k dalším důležitým poznatkům v oblasti problematiky zkoumání tepelných odporů.

Předmětem této diplomové práce bylo mimo jiné sledovat vliv teploty okolí na výsledný součinitel přestupu tepla. Grafy uvedené v příloze naznačují, že součinitel přestupu tepla klesá s rostoucí teplotou okolí. Při měření při teplotě 16 °C byly vypočtené součinitele přestupu tepla pro všechny oděvy nejvyšší, naopak při měření při 28 °C nejnižší. Nárůst součinitele přestupu tepla při nižších teplotách okolí může být způsoben větším teplotním gradientem mezi povrchem těla a okolím a tím zvýšenou turbulencí, která způsobuje větší odvod tepla z manekýna a růst součinitele přestupu tepla h_{cal} . Tento jev můžeme sledovat na všech částech manekýna kromě nohou. Na tomto segmentu pozorujeme hlavně u lehkých oděvů výjimku, h_{cal} je největší při nejvyšší teplotě.

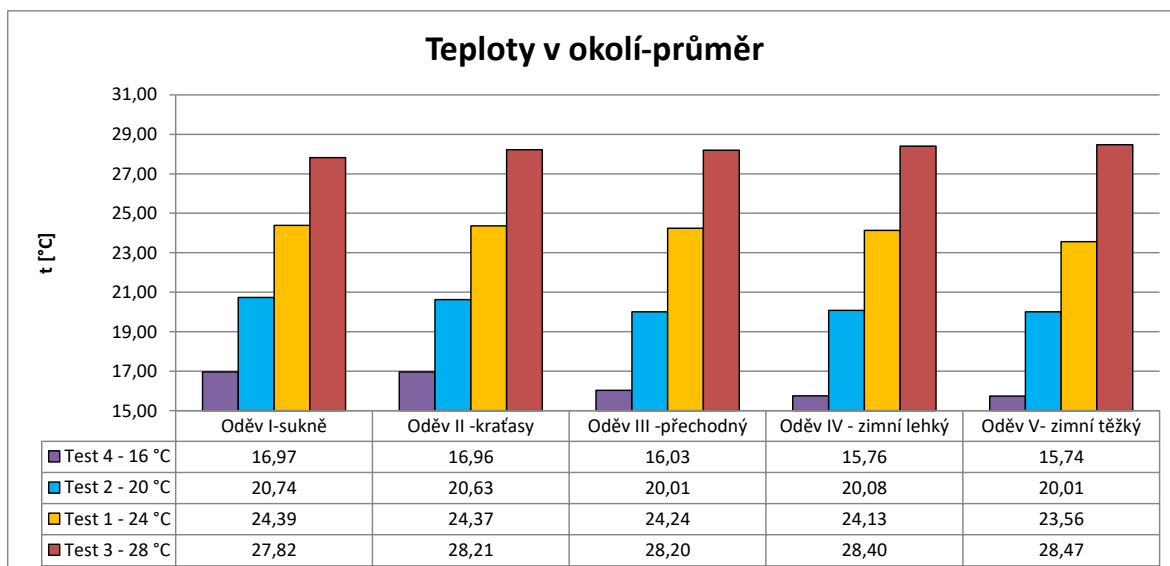
Tato anomálie může mít řadu příčin, neboť vstupní parametry pro výpočet h_{cal} jsou na sobě závislé a vzájemně se ovlivňují. Změnou jednoho parametru je automaticky ovlivněn druhý a proto je při měření obtížné přesně určit původ této výjimky. Vysvětlení můžeme hledat v rozložení teplot v kalibračním boxu a ve způsobu výpočtu součinitele přestupu tepla. Pomocí dvou sond, které byly umístěny ve výšce nohou a hlavy manekýna, byly měřeny teploty AMB 1 a AMB 2. Z těchto teplot byl udělán průměr, který byl použit pro výpočet součinitele přestupu tepla dle rovnice (5.4). V případě měření při nižších teplotách byla sonda umístěná u nohou manekýna silně ovlivněna vyšším tepelným výkonem přenášeným z manekýna a naměřené hodnoty byly výrazně vyšší než ty, které ukazovala sonda AMB2 umístěná u hlavy manekýna. Naopak v případě měření při 28 °C je tepelný výkon přenášený z manekýna nízký a teplotní sonda není tolik ovlivňována manekýnem, tudíž rozdíl mezi teplotami AMB1 a AMB2 je zanedbatelný. Při 28 °C dosahujeme tedy nejhomogennějších podmínek, což se zdá pro měření výhodné, ovšem teplotní gradient mezi povrchem manekýna a okolím je malý, a aby se teplo stihlo odvést, roste h_{cal} .

Graf 9.1 znázorňuje celkový výkon manekýna při všech teplotách a měřených oděvech a je zřejmé, že výkony generované při 28 °C klesají k velmi nízkým hodnotám, které lze považovat za mezní. Oproti měření při teplotě 16 °C dosahují téměř třetinové hodnoty. Nad hodnotu 50 W se dostáváme jen v případě lehkých letních oděvů jako je sukně a kraťasy. Při takto malém výkonu a velké citlivosti manekýna se i malé změny podmínek v kalibračním boxu promítnou na produkovaném tepelném toku a součiniteli přestupu tepla.



Obr. 9.1 Graf celkového výkonu manekýna při jednotlivých teplotách a měřených oděvech

Další odchylkou, kterou můžeme pozorovat v naměřených datech, je trend rostoucího součinitele přestupu tepla h_{cal} na obličej. Přestože se zakrytí obličeje během experimentu nijak nemění, a je tedy předpoklad stejného součinitele přestupu tepla h_{cal} pro všechny oděvy, zaznamenáváme růst součinitele s teplejším oděvem. Tato nepřesnost může být označena za systematickou nejistotu měření. Zimní těžký oděv byl vždy měřen jako poslední, takže prostředí v boxu bylo ovlivněno předchozími měřeními. Hlavně při nižší teplotě okolí je patrný pokles okolní teploty s přibývajícím oděvem. Při teplotě 16 °C je velký teplotní rozdíl mezi teplotou okolí a teplotou povrchu manekýna, jsou tedy vysoké generované výkony (graf 9.1). Při teplejším oděvu (oděv V) je tento výkon oproti sukni (oděv I) téměř poloviční a teplota v boxu není tolik ovlivněna samotným manekýnem, je tedy nižší než pro letní oděvy. Z níže uvedeného grafu je také patrné, že při vyšší teplotě (28 °C) je prostředí v boxu během experimentu homogennější, což souvisí s generovaným tepelným výkonem, který je oproti měření při 16 °C třetinový a neovlivňuje tak výrazně rozložení teplot v boxu (obr. 9. 2). Lze tedy konstatovat, že vlivem produkovaného tepelného výkonu se vytváří v okolí manekýna konvektivní stoupavý proud, který má vliv na podmínky experimentu. Manekýn ovlivňuje teploty ve svém nejbližší okolí a tím i přenos tepla a výsledné součinitele přestupu tepla h_{cal} . Tento efekt se však projevuje stejně i při přenosu tepla z reálného lidského těla, tudíž lze říci, že zachycení tohoto efektu manekýnem není na závadu, ba naopak velice věrně imituje reálné provozní podmínky, za kterých oděvy fungují.



Obr. 9.2 Graf průměrných teplot v okolí manekýna

Ze získaných poznatků o podmínkách v kalibračním boxu při různých teplotách a ověření faktu, že vypočtený součinitel přestupu tepla se výrazně nemění spolu s okolní teplotou, je možné konstatovat, že není nutné měřit stejný oděv při různých teplotách a postačí měření při jedné kalibrační teplotě. Přestože má každá teplota okolí určitý specifický vliv na podmínky experimentu, výsledný součinitel přestupu tepla zůstává pro všechny teploty prakticky stejný. Jako nejvhodnější teplotu pro další experimenty lze tedy označit teplotu 24 °C, která je vhodná i z pohledu nízké energetické náročnosti kalibračních měření v klimatické komoře.

10 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo experimentálně stanovit součinitele přestupu tepla pro vybrané modelové oděvy, provést přepočet na tepelný odpor a následně porovnat obdržené výsledky se stávajícím šatníkem pro systém iHVAC. Předmětem zkoumání byl také vliv různých teplot okolí na měření součinitele přestupu tepla.

První část práce byla věnována teoretickému úvodu do problematiky tepelného komfortu. Stručně jsou vysvětleny tepelné procesy uvnitř člověka a jeho interakce s okolím. Jednotlivé podkapitoly se zabývají způsoby přenosu tepla z těla člověka. Následně byla také rozebrána problematika exaktního hodnocení tepelného komfortu a byly popsány jednotlivé stupnice tepelné pohody a typické kombinace oblečení pro různá roční období. Nastíněna byla také podstata funkce systému iHVAC a skladba dostupného modelového šatníku.

Důležitou část práce tvořil návrh metodiky měření součinitelů přestupu tepla na základě dostupných norem s využitím teoretických poznatků z rešerše. Při výběru konkrétního řešení práce byly zohledněny zkušenosti z předchozích měření na OTTP, dostupnost měřicího zařízení a také časová náročnost experimentu. Bylo proměřeno 5 modelových sad oblečení při 4 různých okolních teplotách vzduchu. K měření byl využit tepelný manekýn Newton a klimatická komora. Aby měření probíhalo podle podmínek uvedených v normě ČSN EN ISO 15831 a ČSN EN ISO 14505-2 [8], [9] byl využit kalibrační box, který byl vytvořen pro potřeby předchozích měření na OTTP. Kalibrační box zajistil dostatečnou homogenitu prostředí a požadovanou rychlost proudění. Detailnějšímu popisu metody a použitého měřicího zařízení byla věnována samostatná kapitola.

Další část práce se zabývá shrnutím naměřených dat, jejich popisem a zhodnocením nejistot měření. Naměřená data byla zpracována do tabulek a grafů, jejichž souhrny jsou uvedeny v textu. Podrobnější grafy jsou součástí přílohy. Důraz byl kladen také na nejistoty měření, které byly uvedeny pro koeficient rozšíření $k_r = 2$, čili pokrývají 95% interval spolehlivosti. Přestože se kvůli vytižení měřicího vybavení povedlo zrealizovat opakování měření za stejných podmínek pouze u jednoho oděvu (zopakováno 3x), byla zjištěna dobrá opakovatelnost zvolené metodiky.

Předposlední kapitola se zabývá porovnáním zjištěných tepelných odporů s odpory ze stávajícího šatníku pro systém iHVAC. Šatník byl navíc obohacen o tepelné odpory oděvů, které nebyly v minulosti ještě měřeny. Byly také vytvořeny diagramy komfortních zón, které slouží k názornějšímu zobrazení teplotních intervalů komfortu pro jednotlivé kombinace oděvů. Pozornost byla věnována také vysvětlení odlišností mezi naměřenými tepelnými odpory a odpory uvedenými ve stávajícím šatníku. Je nastíněno vysvětlení těchto odlišností a navržena opatření, která by mohla být v budoucnosti aplikována pro celkové zlepšení metodiky měření.

Samostatná kapitola se soustředí na rozbor výsledků. Měření potvrdila předpoklad nezávislosti měření součinitele přestupu tepla na okolní teplotě, přesto však byly zaznamenány jisté odchylky a specifika měření při různých teplotách, které jsou popsány v diskuzi. Vyšší teploty s sebou přináší homogennější rozložení teploty v boxu, ovšem tepelný tok z manekýna se na některých částech pohybuje na hranici měřitelnosti. Při nižších teplotách je naopak větší rozdíl mezi teplotou u nohou a u hlavy manekýna, což vnáší chybu do vyhodnocení, neboť součinitel přestupu tepla je vyhodnocován z průměrné teploty. Jako

optimální měřicí teplota se osvědčila teplota 24 °C, která je doporučována normou ČSN EN ISO 14505-2.

Závěrem lze říci, že experiment přinesl nové poznatky o vlivu okolní teploty do oblasti měření tepelných vlastností oděvů a přispěl k upřesnění údajů používaných k řízení systému iHVAC. Zároveň prokázal vhodnost zvoleného postupu řešení. Lze tedy tvrdit, že zvolená metodika povede při dalších měřeních k platným výsledkům. Na tuto práci by bylo možné navázat proměřením dalších kombinací oděvů, případně specifikovat vliv způsobu, jakým je oděv oblečen, např. utažení rukavic, rozepnutá/zapnutá košile nebo zda je tričko zastrčeno v kalhotách či nikoli.

ZDROJE

- [1] ANSI/ASHRAE standard 55-2013: *Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta: ASHRAE, 2013.
- [2] JANOTKOVÁ, Eva. *Technika prostředí: 1. část* [online]. 2014 [cit. 2017-01-17]. Dostupné z: <http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/file/110/>
- [3] POKORNÝ, Jan. *Svázání fyziologického modelu s modelem tepelného komfortu*. Brno, 2012. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Jícha CSc.
- [4] PIDROVÁ, K. *Testování tepelných vlastností rukavic pomocí tepelného manekýna*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Bc. Ing. Jan Fišer Ph.D.
- [5] Chapter 42 - Heat and Cold. *Workplace Health and Safety Information: Encyclopaedia of Occupational Health and Safety* [online]. [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <http://www.ilocis.org/documents/chpt42e.htm>
- [6] BERNACIKOVÁ, Martina. Fyziologie a patofyziologie člověka v extrémních podmínkách. In: Slide Player [online]. 2010 [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/5652843/>
- [7] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. ISBN 80-214-2029-4.
- [8] ČSN EN ISO 15831: *Oděvy-Fyziologické účinky- Měření tepelné izolace pomocí tepelné figuríny*. Český normalizační institut, Praha, 2004.
- [9] ČSN EN ISO 14505-2: *Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného komfortu ve vozidlech*. Český normalizační institut, Praha, 2007.
- [10] NILSSON, H. O. *Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models*. Ph.D. Thesis, University of Gävle, 2004. ISBN 91-7045-7
- [11] JOSÉ A. Orosa Jose. *A Review of General and Local Thermal Comfort Models for Controlling Indoor Ambiences, Air Quality*, Ashok Kumar (Ed.), InTech [online]. 2010 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/air-quality/a-review-of-general-and-local-thermal-comfort-models-for-controlling-indoor-ambiences->
- [12] TOMA, R. *Vytvoření databáze typických skladeb oblečení pro kabiny automobilů*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 80 s. Vedoucí práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.
- [13] Vnímání a předvídavý způsob jízdy, *BESIP* [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.ibesip.cz/cz/ridic/zasady-bezpecne-jizdy/vnimani-a-predvidavy-zpusob-jizdy>
- [14] KENRICK, D. T., MACFARLANE, S. W. Ambient temperature and horn honking: A Field Study of the Heat/Aggression Relationship. *Environment and Behavior*, 1986, 18(2), 179-191 [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0013916586182002>

- [15] How fatigue and excessive heat affects drivers, Mix Telematics [online], [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <http://www.mixtelematics.com/latest-company-news/how-fatigue-and-excessive-heat-affects-drivers>
- [16] MORRIS, Drew M. a June J. PILCHER, The cold driver: Cold stress while driving results in dangerous behavior. Biological Psychology. 2016, vol. 120 [online]. [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0301051116302885?np=y&npKey=c9e7aae204c69399116d5a9d5245952b9502c4069021400b38e80520a8bdabba>
- [17] FIŠER, Jan a Jan POKORNÝ. Laboratoř tepelného komfortu. Energetické fórum [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/laboratore/laborator-tepelneho-komfortu>
- [18] FIŠER J., POKORNÝ P. Tepelný komfort a HVAC. Energetické fórum [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/projekty/oblast-tepelny-komfort>
- [19] TOMA, R. Metodika pro testování prostředí v kabině osobního vozu s využitím tepelného manekýna a testovacích osob. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 74 s. Vedoucí práce Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.
- [20] ŠTĚTINA, Josef. Klimatická komora. Energetické fórum [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/laboratore/klimaticka-komora>
- [21] Manuál tepelný manekýn Newton. Measurements Technology Northwest, 2010.
- [22] FIŠER, Jan. Tepelný manekýn Newton. Energetické fórum [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/pristrojove-vybaveni/tepelny-mankyn-newton>
- [23] 3- kanálový teploměr: Testo 735-Manuál. Praha: Testo, 2005.
- [24] Testo 435-multifunkční měřicí přístroj [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://www.testo.com/cz-CZ/testo-435-4/p/0563-4354>
- [25] FOJTLÍN, Miloš, Jan FIŠER a Miroslav JÍCHA. Determination of convective and radiative heat transfer coefficients using 34-zones thermal manikin: Uncertainty and reproducibility evaluation. Experimental Thermal and Fluid Science. 2016 [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177716300917>
- [26] NĚMEČEK P. Nejistoty měření. Praha: Česká společnost pro jakost, o.s., 2008. ISBN 9788002020899.
- [27] PAVELEK M., ŠTĚTINA J. Experimentální metody v technice prostředí. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2007. ISBN 978-214-3426-4.
- [28] FOJTLÍN, M. Stanovení součinitelů přenosu tepla radiací a konvekci z povrchu tepelného manekýna. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 63 s. Vedoucí práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
iHVAC	innovative system for Heating, Ventilation and Air-Conditioning control = inovativní systém pro řízení vytápění, větrání a klimatizace
ASHRAE	American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers = americká společnost inženýrů v oblasti vytápění, chlazení a klimatizace
PMV	Predicted mean vote = předpokládaný střední tepelný pocit
PPD	Predicted percentage of dissatisfied = předpokládané procento nespokojených
MTV	Mean thermal vote = střední tepelný pocit
VUT FSI Brno	Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Brno
OTTP	Odbor termomechaniky a techniky prostředí, VUT Brno

Symbol	Jednotka	Popis
a	-	absorptance
b, c	W/m^2	Lineární regresní konstanty
E_0	W/m^2	Zářivost černého tělesa
h_{cal}	W/m^2	složený součinitel přenosu tepla určený při kalibrování ve standardním prostředí
k_{uA}	-	Bezpečnostní faktor
n	-	Počet měření
\dot{Q}	W	Teplený tok
\dot{q}	W/m^2	Měrný tepelný tok
\dot{q}_n	W/m^2	Měrný tepelný tok neoblečeného člověka
\dot{q}_0	W/m^2	Měrný tepelný tok oblečeného člověka
R	$m^2 \cdot K/W$	Tepelný odpor

R_{cl}	$m^2.K/W$	Tepelný odpor oděvu
R_T	$m^2.K/W$	Celkový tepelný odpor
R_v	$m^2.K/W$	Tepelný odpor vzduchové vrstvy
R_α	$m^2.K/W$	Odpor proti konvekci
R_λ	$m^2.K/W$	Odpor proti vedení
r	-	reflexivita
S	m^2	plocha
$s(x)$	Dané veličinou	Směrodatná odchylka od aritmetického průměru
T_a	K	Teplota okolí
T_{eq}	K	Ekvivalentní teplota
T_p	K	Teplota pokožky
T_w	K	Teplota obtékaného povrchu tělesa
t	-	transmisivita
$u_A(x)$	Dané veličinou	Nejistota typu A měřené veličiny x
$u_B(x)$	Dané veličinou	Nejistota typu B měřené veličiny x
α	$W/m^2.K$	Součinitel přestupu tepla
δ	m	Tloušťka vrstvy
λ	$W/m.K$	Součinitel tepelné vodivosti
σ	$W/m^2.K^4$	Stefan-Bolzmannova konstanta
$u_C(x)$	Dané veličinou	Kombinovaná nejistota
U	Dané veličinou	Rozšířená nejistota
k_r	-	Koeficient rozšíření

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3.1 Přehled metabolických tepelných toků [2]	14
Obr. 3.2 Teplotní zóny lidského těla [6]	15
Obr. 3.3 Termoregulace [4]	17
Obr. 3.4 Přenos tepla z lidského těla [6]	18
Obr. 3.5 Vedení tepla rovinnou stěnou [4]	19
Obr. 3.6 Přenos tepla konvekci [4]	21
Obr. 3.7 Prostup tepla přes jednotlivé vrstvy oblečeného člověka [4]	23
Obr. 3.8 Zjednodušené schéma prostupu tepla přes oblečení [4]	23
Obr. 3.9 Graf závislosti PPD na PMV [11]	26
Obr. 4.1 Uživatelské rozhraní aplikace iHVAC [18]	27
Obr. 4.2 Nastavení virtuálního šatníku v aplikaci iHVAC [18]	28
Obr. 5.1 Princip ekvivalentní teploty [10]	32
Obr. 5.2 Různé možnosti využití klimakomory [20]	34
Obr. 5.3 Tepelný manekýn Newton [21]	35
Obr. 5.4 Segmenty tepelného manekýna [18]	35
Obr. 5.5 TESTO [24]	36
Obr. 5.6 Umístění a ukotvení tepelného manekýna	37
Obr. 5.7 Rozmístění měřicích sond	38
Obr. 5.8 Rozmístění měřicího zařízení	38
Obr. 6.1 Detail trička se zadním zapínáním	39
Obr. 6.2 Přehled vybraných druhů modelových oděvů	40
Obr. 6.3 Konstrukce kalibračního boxu	41
Obr. 7.1 Graf součinitele přestupu tepla pro oděv I-sukně	42
Obr. 7.2 Graf součinitele přestupu tepla pro oděv II-kraťasy	43
Obr. 7.3 Porovnání oděvu I-sukně a oděvu II-kraťasy	43
Obr. 7.4 Graf součinitele přestupu tepla pro oděv III-přechodný	44
Obr. 7.5 Graf součinitele přestupu tepla pro oděv IV-zimní lehký	44
Obr. 7.6 Graf součinitele přestupu tepla pro oděv V-zimní těžký	45
Obr. 7.7 Součinitele přestupu tepla - 24 °C- Oděv III-přechodný oděv	50

Obr. 8.1 Diagram komfortních zón- oděv I-sukně.....	54
Obr. 8.2 Diagram komfortních zón- oděv II-kraťasy.....	54
Obr. 8.3 Diagram komfortních zón - oděv III-přechodný.....	55
Obr. 8.4 Diagram komfortních zón- oděv IV-zimní lehký	56
Obr. 8.5 Diagram komfortních zón- oděv V-zimní těžký.....	57
Obr. 9.1 Graf celkového výkonu při jednotlivých teplotách a měřených oděvech.....	59
Obr. 9.2 Graf průměrných teplot v okolí manekýna	60

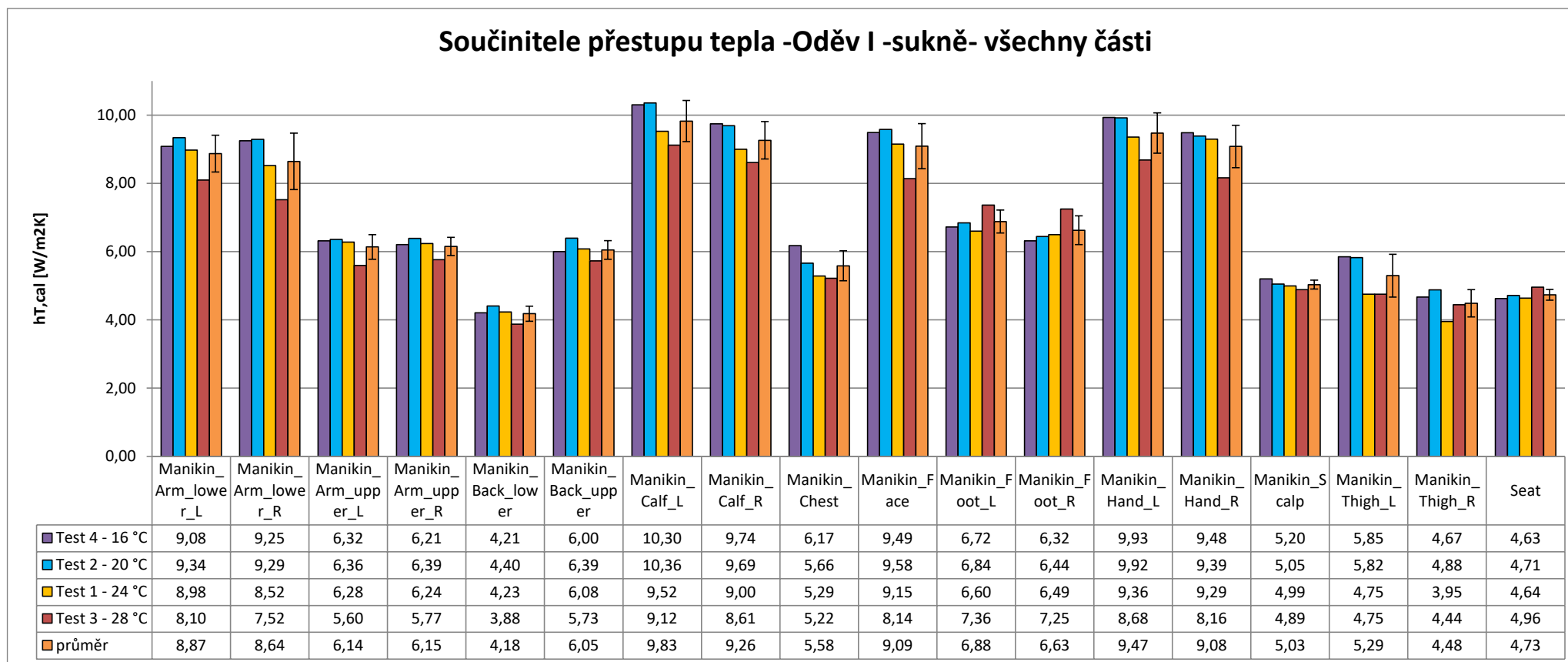
SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Bedfordova stupnice tepelného komfortu [10].....	25
Tab. 3.2 ASHRAE stupnice tepelného komfortu [10].....	25
Tab. 3.3 MTV stupnice tepelného komfortu [10].....	26
Tab. 4.1 Detailní přehled virtuální šatníku	28
Tab. 5.1 Přehled použitých měřicích sond	37
Tab. 6.1 Přehled měřených kombinací oděvů	39
Tab. 7.1 Bezpečnostní faktor [26]	46
Tab. 7.2 Součinitele přestupu tepla pro opakované měření při 24 °C	47
Tab. 7.3 Naměřené veličiny pro opakované měření při 24 °C	48
Tab. 7.4 Nejistoty měření pro opakované měření při 24 °C	49
Tab. 8.1 Tepelný odpor - hlava.....	51
Tab. 8.2 Tepelný odpor - tělo	52
Tab. 8.3 Tepelný odpor - ruce	52
Tab. 8.4 Tepelný odpor- nohy	53
Tab. 8.5 Tepelný odpor - chodidla	53

SEZNAM PŘÍLOH

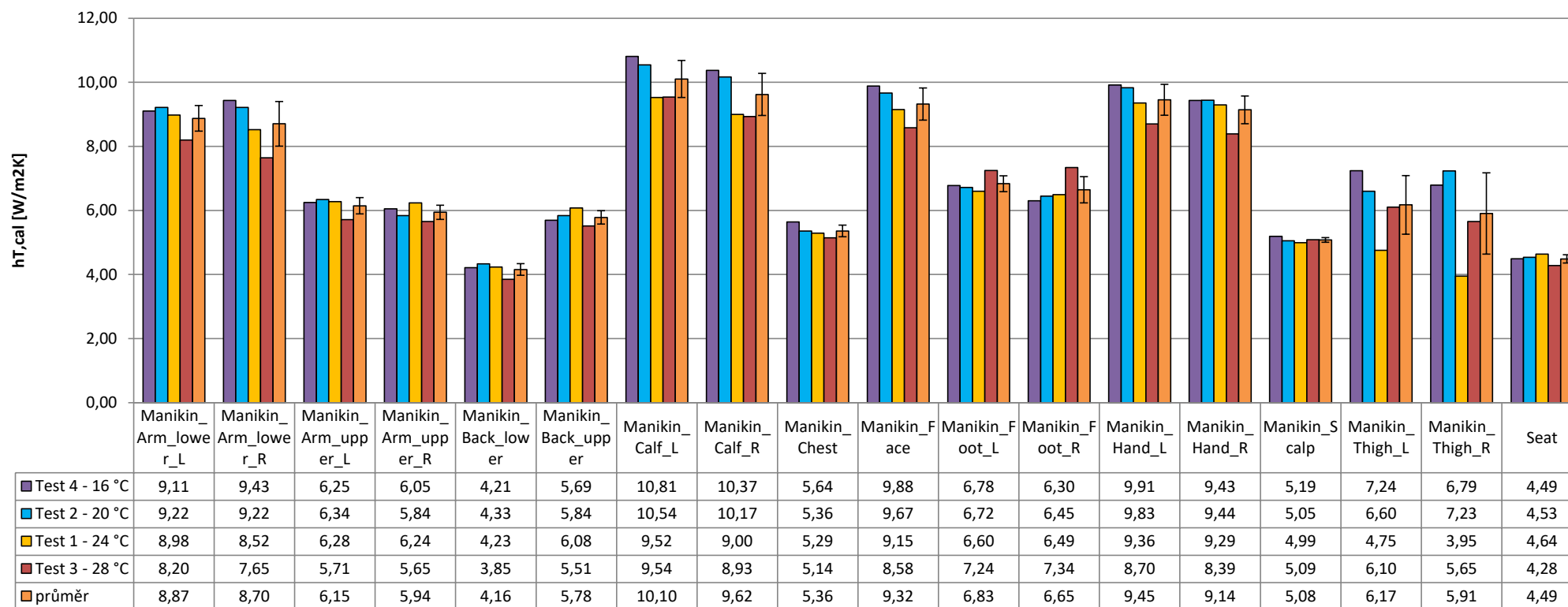
- 1 Graf součinitelů přestupu tepla pro všechny části pro oděv I-sukně
- 2 Graf součinitelů přestupu tepla pro všechny části pro oděv II-kraťasy
- 3 Graf součinitelů přestupu tepla pro všechny části pro oděv III-přechodný
- 4 Graf součinitelů přestupu tepla pro všechny části pro oděv IV-zimní lehký
- 5 Graf součinitelů přestupu tepla pro všechny části pro oděv V-zimní těžký
- 6 Původní virtuální šatník pro systém iHVAC
- 7 Nový proměřený virtuální šatník pro systém iHVAC

1 Graf součinitelů přestupu tepla pro všechny části pro oděv I-sukně

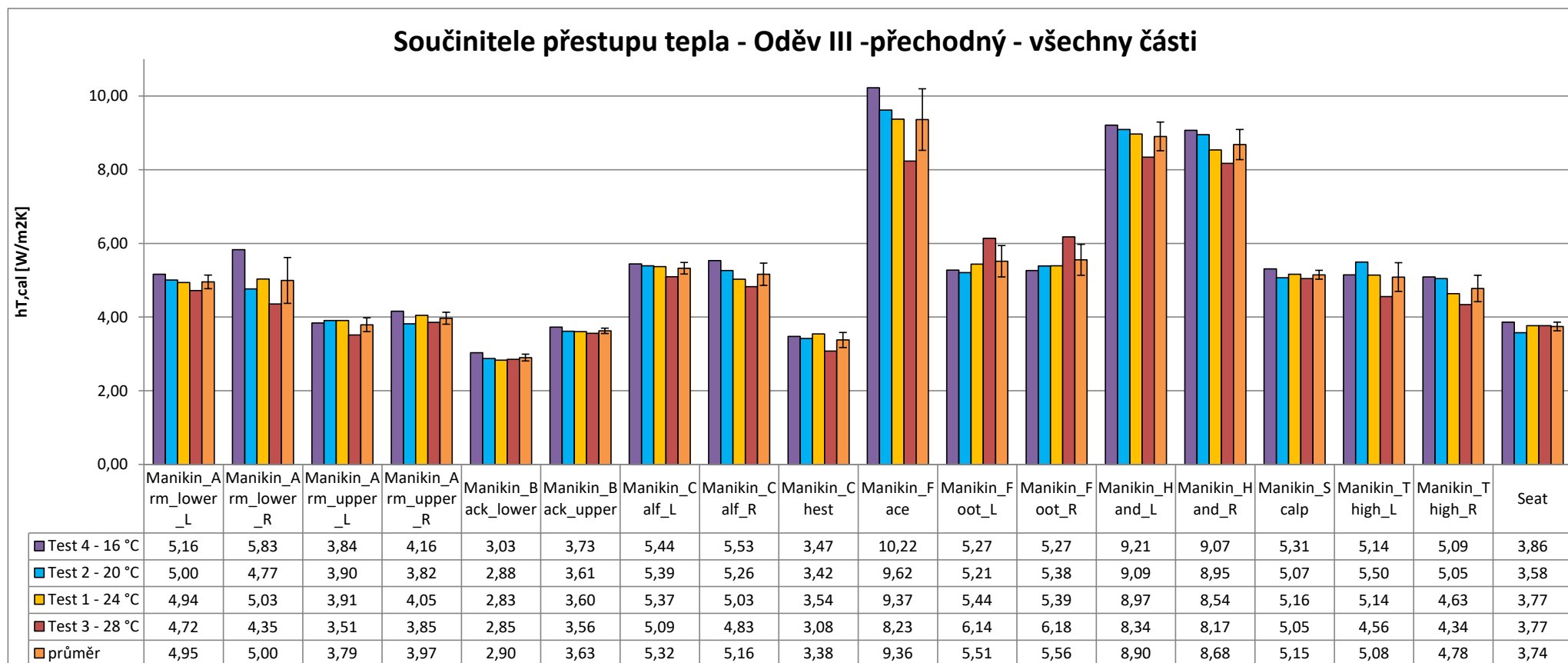


2 Graf součinitelů přestupu tepla pro všechny části pro oděv II- kratřasy

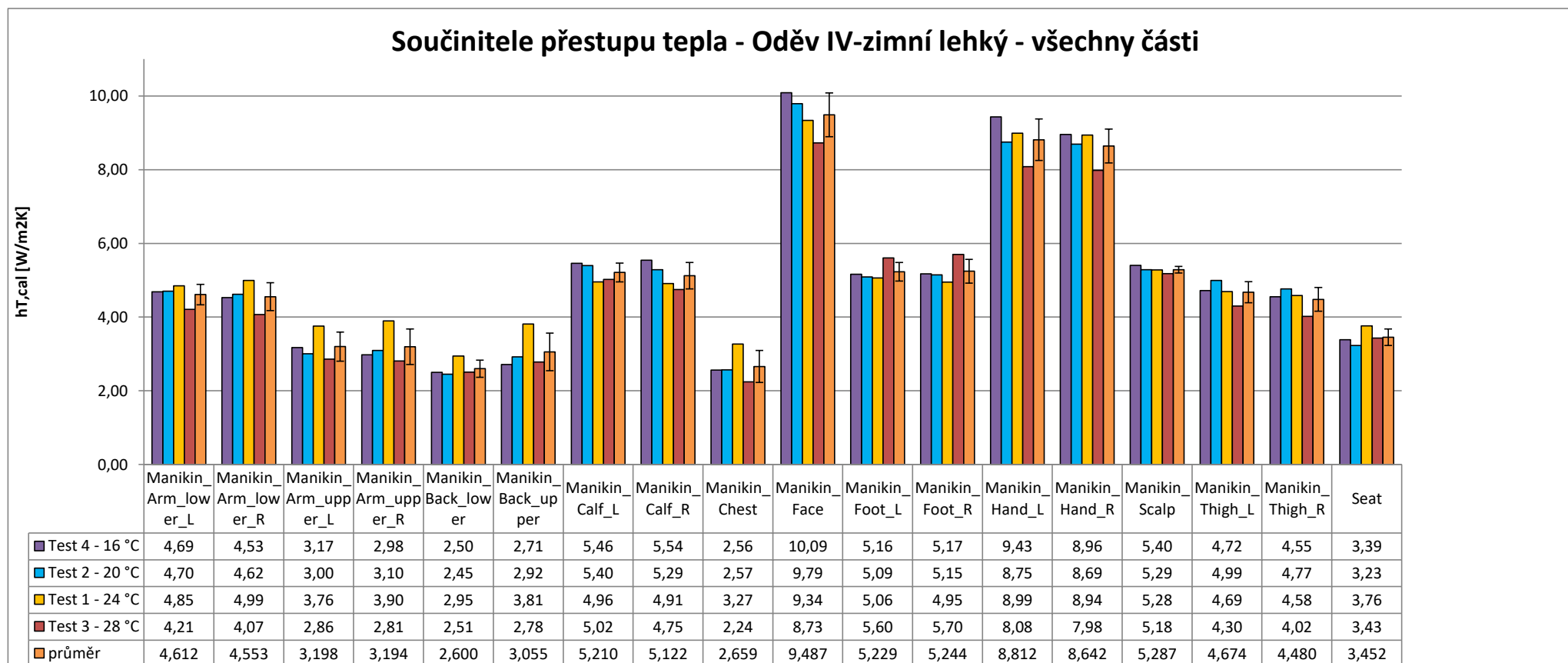
Součinitele přestupu tepla - Oděv II- kratřasy - všechny části



3 Graf součinitelů přestupu tepla pro všechny části pro oděv III-přechodný

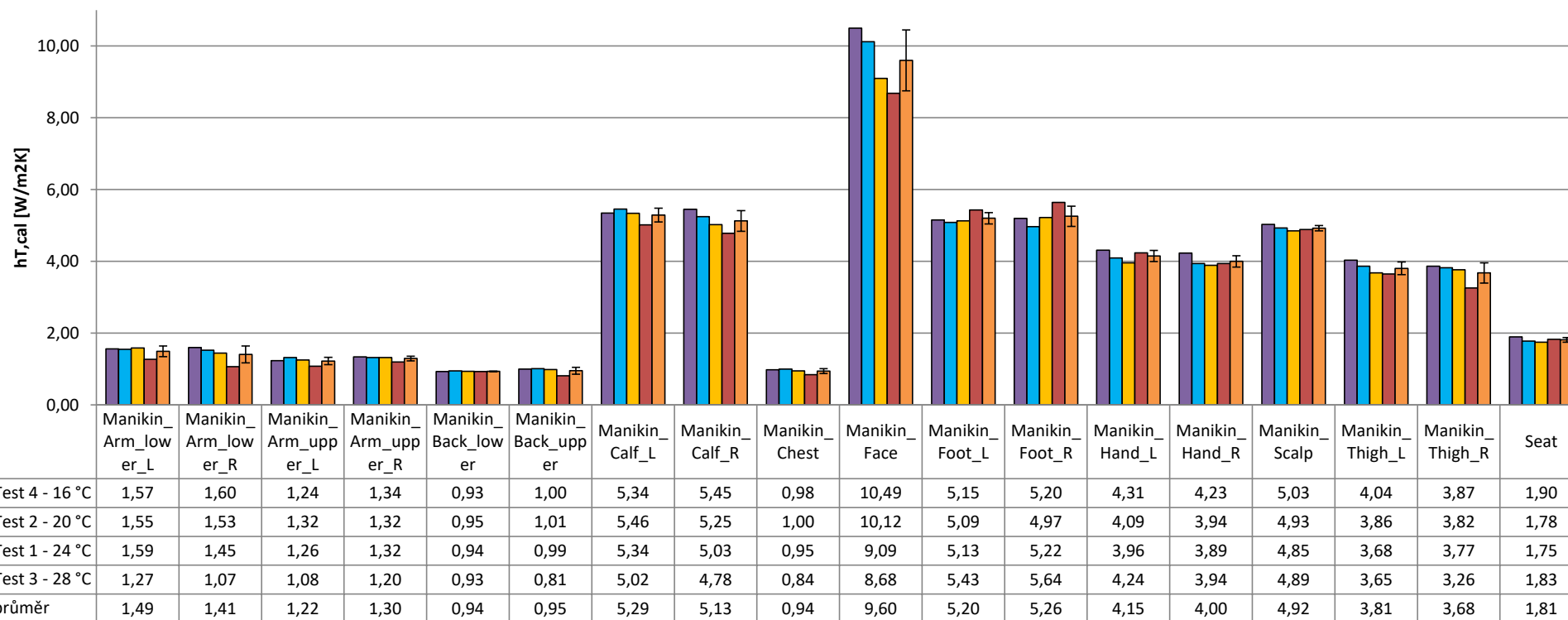


4 Graf součinitelů přestupu tepla pro všechny části pro oděv IV-zimní lehký



5 Graf součinitelů přestupu tepla pro všechny části pro oděv V-zimní těžký

Součinitele přestupu tepla- Oděv V- zimní těžký - všechny části



6 Původní virtuální šatník pro systém iHVAC

DATA PRO ŠATNÍK		Ra=1/alpha	Rcl [m2K/W] Měrný tepelný odpor oděvu pro zvolený oděv ze šatníku															
Body parts	Names	Air layer	no hair	hair	cap	winter cap	Tshirt	shirt	sweatshirt	winter jacket	no gloves	gloves	shorts	skirt	trousers	sandal	shoes	boots
HEAD	Scalp (hair)	0,065	0,044	0,137	0,187	0,237	NaN	NaN	NaN	x	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	Face	0,065	0,044	0,044	0,044	0,098	NaN	NaN	NaN	x	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
TORSO	Chest	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,150	0,240	0,299	x	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	Back upper	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,120	0,214	0,261	x	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	Back lower	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,231	0,318	0,342	x	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	L up arm	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,144	0,222	0,245	x	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	R up arm	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,144	0,222	0,244	x	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	L lo arm	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,059	0,168	0,189	x	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	R lo arm	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,059	0,168	0,189	x	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
HANDS	L hand	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	x	0,051	0,143	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	R hand	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	x	0,051	0,143	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
LEGS	L thigh	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	x	NaN	NaN	0,157	0,157	0,156	NaN	NaN	NaN
	R thigh	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	x	NaN	NaN	0,157	0,157	0,156	NaN	NaN	NaN
	L calf	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	x	NaN	NaN	0,065	0,065	0,144	NaN	NaN	NaN
	R calf	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	x	NaN	NaN	0,065	0,065	0,144	NaN	NaN	NaN
FEET	L foot	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	x	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,122	0,124	0,218
	R foot	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	x	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,122	0,124	0,218
	Seat	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	x	NaN	NaN	0,187	0,187	0,180	NaN	NaN	NaN

Pozn.: NaN = Not a Number = hodnota, která nereprezentuje číslo

7 Nově proměřený virtuální šatník pro systém iHVAC

DATA PRO ŠATNÍK		Ra=1/alpha	Rcl [m2K/W] Měrný tepelný odpor oděvu pro zvolený oděv ze šatníku															
Body parts	Names	Air layer	no hair	hair	cap	winter cap	Tshirt	shirt	sweatshirt	winter jacket	no gloves	gloves	shorts	skirt	trousers	sandal	shoes	boots
HEAD	Scalp (hair)	0,065	x	0,131	x	x	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	Face	0,065	x	0,042	x	x	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
TORSO	Chest	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,118	0,232	0,318	0,999	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	Back upper	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,104	0,211	0,268	0,991	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	Back lower	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,240	0,280	0,322	1,002	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	L up arm	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,098	0,199	0,251	0,757	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	R up arm	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,101	0,187	0,253	0,709	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	L lo arm	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,048	0,137	0,152	0,610	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	R lo arm	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	0,051	0,137	0,156	0,662	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
HANDS	L hand	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,045	0,176	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	R hand	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,048	0,185	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
LEGS	L thigh	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,101	0,126	0,160	NaN	NaN	NaN
	R thigh	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,114	0,159	0,171	NaN	NaN	NaN
	L calf	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,034	0,037	0,125	NaN	NaN	NaN
	R calf	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,039	0,043	0,130	NaN	NaN	NaN
FEET	L foot	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,081	0,124	x
	R foot	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,086	0,123	x
	Seat	0,065	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,158	0,146	0,305	NaN	NaN	NaN

Pozn.: NaN = Not a Number = hodnota, která nereprezentuje číslo